INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2020 • N.º 521 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ESCAPAR DE UN AGUJERO NEGRO

¿Cómo logra la información fugarse de estos enigmáticos astros?

NEUROCIENCIA
¿Llegarán a ser conscientes las máquinas?

FÍSICA
Pasado, presente y futuro del sincrotrón ALBA

CONSERVACIÓN
Minería y restauración ambiental en Madagascar





INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Febrero 2020, Número 521

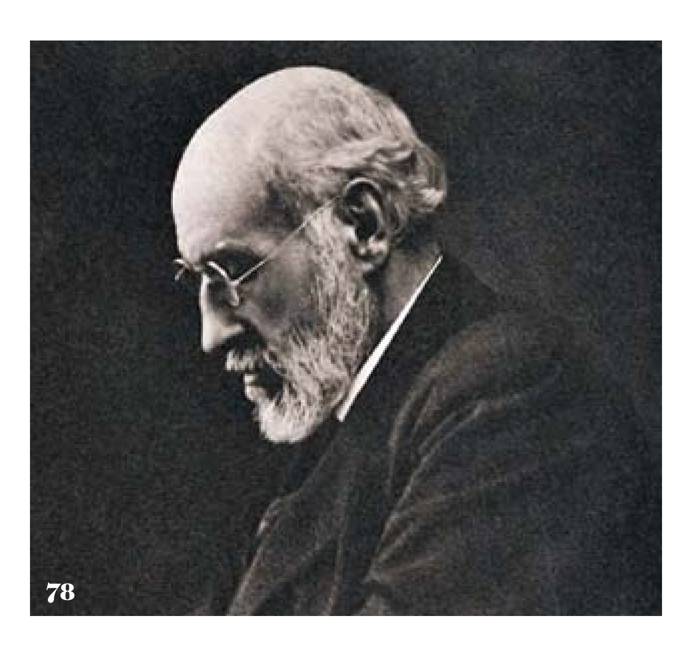
70

ARTÍCULOS

FRANCO ANDREONE


9

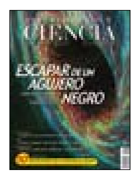

52


78

INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La evaporación de los agujeros negros parece implicar que la información que cae en ellos acaba destruida. Pero eso contradice los principios básicos de la mecánica cuántica, así que los físicos tratan de explicar cómo podría escapar esa información. Las nuevas observaciones del Telescopio del Horizonte de Sucesos y de los detectores de ondas gravitacionales podrían servir para poner a prueba sus teorías. Ilustración de Mondolithic Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Julio 2019

LAS MUJERES DEL APOLO 11

«Un pequeño paso atrás en el tiempo» [Investigación y Ciencia, julio de 2019], de Clara Moskowitz, incluye una fotografía de la sala de control del Centro Espacial Kennedy durante el lanzamiento del Apolo 11. En medio de un mar de pelos cortos, camisas blancas y corbatas oscuras, puede verse a la ingeniera de la NASA JoAnn Morgan sentada en su consola. Si se observa con atención, junto a la pared derecha aparecen otras tres mujeres. Como sin duda les habrá pasado a otros lectores, me gustaría saber algo más sobre las mujeres que estaban presentes aquel día en la sala de control, quiénes eran y por qué estaban allí.

Isaac Freund
Departamento de Física
Universidad Bar-Ilan, Israel

Responde Morgan: *Ignoro quiénes eran las mujeres que estaban al fondo. Entraron por la puerta trasera para escuchar los discursos de las personalidades, que tuvieron lugar unos 40 minutos después del lanzamiento. Yo no las conocía: podían haber sido oficinistas, encargadas del reparto de correo o miembros del personal administrativo presente en el edificio.*

En la instalación había muy pocas mujeres de la NASA. Durante las pruebas, Judy Kersey, la primera ingeniera de sistemas de guiado, solía informar a su jefe de división, que estaba sentado en la misma fila que yo. Pero creo que durante el lanzamiento Kersey se quedó en el Edificio Central de Instrumentación. Las puertas de la sala de control se abrieron 30 minutos después del despegue, una vez que los motores de la primera y la segunda etapa se encendieron con éxito. También recuerdo que Boeing tenía a una redactora que ayudaba a los ingenieros con los distintos trámites.

¿MÁS O MENOS FÁRMACOS CONTRA EL CÁNCER?

Como oncólogo clínico, he disfrutado leyendo el artículo de James DeGregori y Robert Gatenby «Control darwiniano del cáncer» [Investigación y Ciencia, octubre de 2019]. La idea de tratar el cáncer de próstata metastásico controlando su crecimiento para evitar la aparición de tumores resistentes a los fármacos (en lugar de tratando de aniquilar todas las células cancerosas) es intrigante y merece un gran ensayo aleatorizado de fase III. Pero es importante recordar que, biológicamente, los cánceres son extremadamente heterogéneos, por lo que cabe oponer algunas objeciones a los principios que esbozan los autores.

En primer lugar, algunos cánceres en fase avanzada (especialmente el de testículo, la enfermedad de Hodgkin y el linfoma de células grandes) pueden curarse con una terapia vigorosa. Existen pruebas sólidas de que reducir la dosis o interrumpir el tratamiento comprometen las posibilidades de curación. En segundo lugar, en el caso del cáncer de mama localizado, un tratamiento hormonal ininterrumpido y a largo plazo resulta clave para prevenir la metástasis. Los estudios demuestran que, para muchas personas, diez años de tratamiento son mejores que cinco. Por último, uno de los mayores éxitos de la medicina (el tratamiento de la leucemia linfoblástica aguda pediátrica, que hoy muestra una tasa de curación de entre el 80 y el 90 por ciento) requiere tanto una intensidad inicial óptima como un tratamiento ininterrumpido a largo plazo, a menudo durante tres años.

Para la mayoría de los cánceres metastásicos avanzados para los que aún no existe una cura, la programación de la terapia merece sin duda un estudio cuidadoso. Cuando se trata de cáncer en humanos, sin embargo, muchas teorías sobre cómo debería funcionar el tratamiento han fracasado.

Cary Peterson
Lincoln, Nebraska



Octubre 2019



SALA DE CONTROL durante el lanzamiento del Apolo 11, el 16 de julio de 1969. La ingeniera JoAnn Morgan aparece en el centro de la imagen.

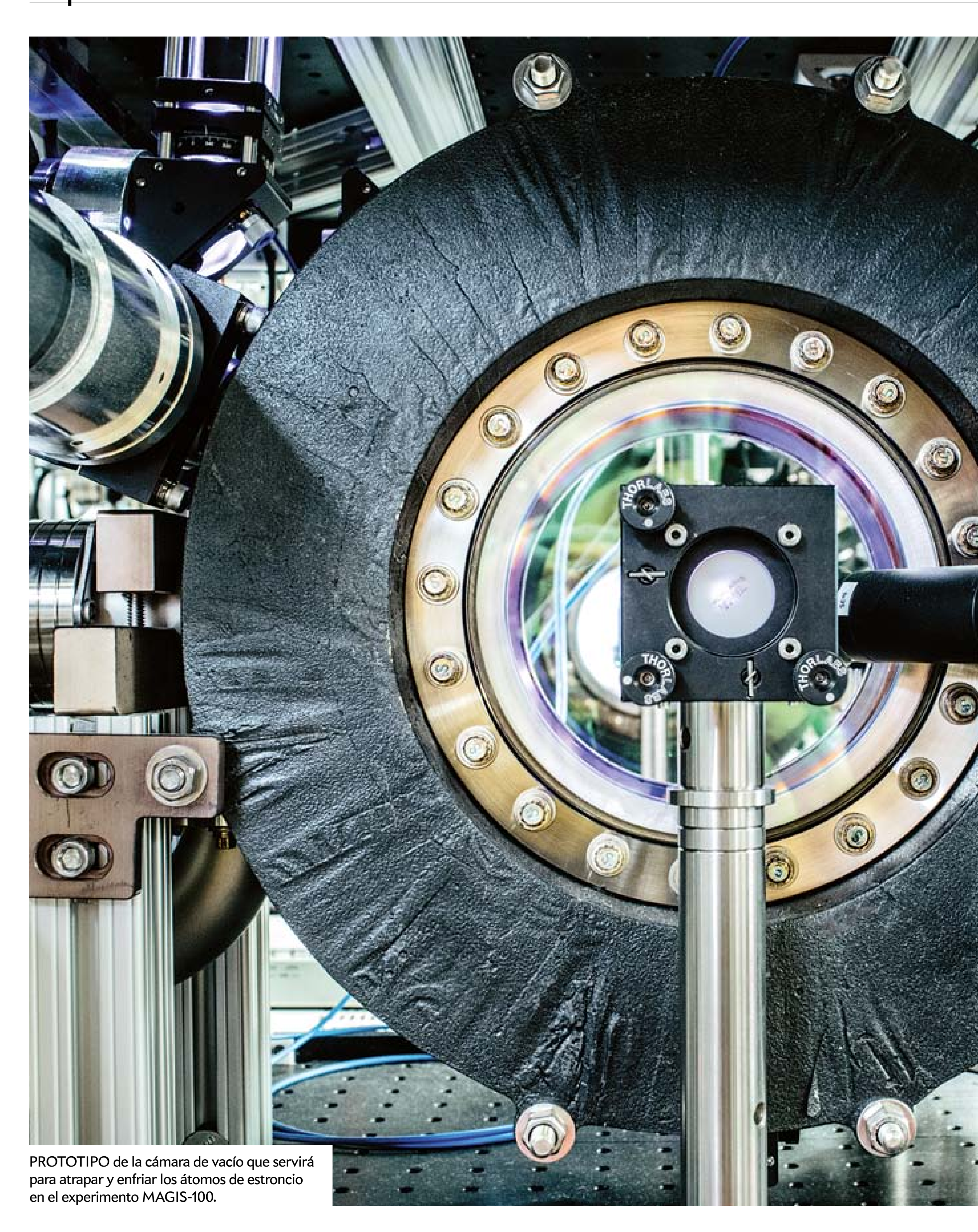
NASA

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



PROTOTIPO de la cámara de vacío que servirá para atrapar y enfriar los átomos de estroncio en el experimento MAGIS-100.





TIMOTHY ARCHIBALD

FÍSICA

Átomos gigantes

Un experimento explorará la materia oscura llevando átomos a estados de superposición separados por distancias macroscópicas

Los investigadores se preparan para escudriñar la naturaleza a pequeñas distancias «estirando» átomos ultrafríos hasta escalas macroscópicas mientras los dejan caer por un tubo de vacío de 100 metros. Aprovechando las propiedades ondulatorias de los átomos, el experimento buscará posibles señales de la elusiva materia oscura y, en un futuro, ondas gravitacionales de nuevas frecuencias.

Científicos de ocho instituciones han unido sus esfuerzos para convertir el pozo de una mina de Illinois en el interferómetro atómico más grande del mundo: el Sensor Interferométrico de Gradiómetro Atómico de Ondas de Materia (MAGIS-100). Tras completar la fase de diseño, los investigadores pretenden montar el instrumento en 2021 y, poco después, comenzar a usar los láseres para inducir estados de superposición en átomos de estroncio y separarlos a grandes distancias. «En el verano de 2021 es cuando las cosas empezarán a ponerse verdaderamente interesantes», afirma Rob Plunkett, investigador principal del proyecto en el Fermilab, el laboratorio que acogerá el experimento.

Con un total de 12,3 millones de dólares entre fondos privados y públicos, el proyecto se suma a toda una serie de investigaciones de precisión que tratan de llenar el vacío existente entre los pequeños experimentos de sobremesa desarrollados en una única universidad y los proyectos de varios decenios y miles de millones de dólares como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) o el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). Para explorar el gran abanico de masas y propiedades que podría tener la materia oscura «[también] se necesitan proyectos a pequeña escala: no puedes jugártelo todo a una carta», sostiene Asimina Arvanitaki, investigadora del Instituto Perimeter de Física Teórica en Ontario que no participa en MAGIS-100.

En el experimento se manipularán átomos en caída libre con láseres. Un pulso láser puede interaccionar con un átomo individual e inducir en él una superposición de estados cuánticos, correspondientes a haber absorbido o no la energía del láser. Esto recuerda al célebre gato de Schrödinger, que se encuentra en una mezcla de los estados «vivo» y «muerto». Según la mecánica cuántica, todo lo que hay en la naturaleza, desde un fotón a una bola de beisbol, tiene propiedades ondulatorias, aunque estas sean imperceptibles en los objetos grandes. Cuando los láseres de MAGIS exciten un átomo de la manera adecuada, su naturaleza ondulatoria le permitirá «extenderse en el espacio» (es decir, adoptar una superposición de estados de movimiento caracterizados por una separación espacial macroscópica), con la componente excitada de la onda atómica (la que absorbe la energía del láser) desplazándose a mayor velocidad.

Un prototipo de MAGIS de 10 metros de altura ubicado en la Universidad Stanford (y que actualmente es uno de los mayores instrumentos de

este tipo) ha batido un récord al producir separaciones de más de medio metro entre los estados. La instalación del Fermilab debería alcanzar varios metros. A medida que los átomos bajan por el pozo, un segundo pulso láser recombinará la componente excitada de cada onda atómica con su compañera más lenta. Midiendo la interferencia entre ambas, los investigadores podrán establecer con precisión la aceleración del átomo que cae. Dado que los átomos estarán en caída libre durante todo el proceso, las vibraciones producidas por terremotos o por camiones que circulen en las inmediaciones apenas deberían afectar a las medidas.

MAGIS-100 dejará caer simultáneamente un millón de estas ondas atómicas a lo largo de las secciones superior e inferior del pozo. Analizando aún más patrones de interferencia —comparando los de las nubes superior e inferior de átomos— el aparato será capaz de detectar minúsculas discrepancias con las leyes físicas conocidas a lo largo de todo el instrumento. Por ejemplo, cualquier pequeña diferencia en la manera en que caen las ondas atómicas podría revelar la presencia de partículas desconocidas en el espacio a través del que viajaron. «Cuanto más tiempo dure la caída [de los átomos], más precisa será la medida», afirma el físico de Stanford Jason Hogan, que contribuyó al desarrollo del prototipo.

La materia oscura, que parece constituir alrededor del 80 por ciento de la materia del universo pero no puede detectarse por métodos habituales, podría producir efectos medibles en este experimento. La mayoría de los proyectos de detección de materia oscura han buscado las llamadas partículas masivas que interaccionan débilmente (WIMP), un tipo de partículas pesadas predichas por la teoría. Pero, dado que no han aparecido, empiezan a considerarse otras alternativas.

Entre los numerosos modelos de materia oscura, las partículas ultraligeras —que según Plunkett constituyen «todo un continente inexplorado»— están cobrando fuerza. Estos objetos fantasmales podrían influir de diversas maneras en las partículas conocidas, según Surjeet Rajendran, físico teórico de la Universidad Johns Hopkins y colaborador de MAGIS. El aparato MAGIS-100 debería ser capaz de detectar dos efectos producidos por estas partículas, que podrían ser mil trillones de veces más ligeras que el electrón: variaciones en el valor de las constantes fundamentales y perturbaciones producidas por una quinta fuerza aún desconocida. MAGIS sería entre cientos y miles de veces más sensible a estos cambios que los instrumentos actuales.

Mientras algunos investigadores prefieren buscar partículas con propiedades concretas predichas por la teoría, otros optan por tender la red más amplia que permita la tecnología. Los aceleradores de partículas ya han explorado minuciosamente el dominio de las partículas pesadas y con interacciones intensas. A pesar de ello, al modelo estándar de la física de partículas parecen faltarle aún algunas piezas cruciales. Gray Rybka, físico de la Universidad de Washington que no participa en MAGIS, señala que «existe la sensación de que realizar un descubrimiento en el intervalo de masas más bajas podría resultar más sencillo». Y añade que el número de científicos que comparten esa opinión «no ha dejado de multiplicarse en la última década».

Aun sin saber exactamente qué está buscando, MAGIS «ampliará notablemente el alcance de los experimentos actuales», asegura Arvanitaki.

FARMACOLOGÍA

Hongos contra el dolor

Una proteína fúngica podría ser una fuente de nuevos opiáceos

Los opiáceos calman el dolor con suma eficacia porque activan ciertos receptores, proteínas celulares que responden a sustancias específicas. El lado negativo es que en ocasiones causan graves efectos adversos que pueden ser mortales, como la depresión respiratoria. Una investigación reciente podría inspirar opiáceos de nueva generación que proporcionarían analgesia con menos riesgos.

Científicos de Australia han descubierto unos péptidos (cadenas cortas de aminoácidos) que actúan en cierto modo como los opiáceos y que proceden de una fuente inesperada: un hongo *Penicillium*. «Se descubrió en un estuario inalterado en uno de los confines del mundo: Tasmania», afirma Macdonald Christie, neurofarmacólogo de la Universidad de Sídney y autor principal del nuevo estudio, publicado el pasado octubre en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Asegura que, fuera del sistema nervioso de los vertebrados, raramente se encuentran péptidos que activen tales receptores y modifiquen la intensidad del dolor.

Los receptores de los opiáceos pertenecen a una familia que controla innumerables funciones cerebrales. En las neuronas donde se sitúan, transmiten señales a través de un tipo de moléculas llamada proteínas G. Durante un tiempo se pensó que los fármacos que interaccionaban con el receptor de los opiáceos sencillamente estimulaban o inhibían la transmisión de las señales a través de las proteínas G, afirma Christie. Pero desde entonces se ha descubierto que dichos receptores están vinculados con muchas otras proteínas, por lo que influyen en múltiples vías de transducción de señales en el interior de la célula.



Hongos *Penicillium*

DR MICROBE, GETTY IMAGES

«La mayoría de los descubrimientos de fármacos en este campo se han basado en activar o desactivar la interacción con las proteínas G», aclara Laura Bohn, neurocientífica del Instituto de Investigación Scripps en Florida, que no ha intervenido en el trabajo. Pero «en lugar de seguir pulsando el interruptor sin más, ahora buscamos modos de conseguir exactamente lo que queremos. Y lo que queremos es aliviar el dolor, no causar una depresión respiratoria por una sobredosis, ni tampoco una adicción». La investiga-

E incluso si la materia oscura resultase invisible para MAGIS-100, el aparato también puede realizar avances en el campo de las ondas gravitacionales. Aunque no será capaz de detectarlas por sí mismo, servirá para poner a prueba y desarrollar la tecnología que se usará en una futura versión del experimento, la cual podrá registrar pequeñas perturbaciones espaciales al dejar caer nubes de átomos separadas por un kilómetro. Este método podría medir ondas gravitacionales con frecuencias demasiado bajas para LIGO y demasiado altas para el futuro detector espacial LISA (Antena Espacial de Interferometría Láser), como las producidas por los agujeros negros y las estrellas de neutrones tiempo antes de chocar. Un hipotético proyecto «MAGIS-1000» sería capaz de proporcionar a los telescopios alertas tempranas de tales colisiones.

Por ahora, los investigadores esperan que MAGIS-100 les permita abrir una nueva vía de acceso al mundo de la materia oscura ultraligera. Tim Kovachy, físico de la Universidad del Noroeste que trabaja en el sistema láser del experimento, indica que «hay que hacer todo lo posible. Estamos muy motivados para no dejar un rincón sin explorar».

—Charlie Wood

ción de Bohn ha vinculado los efectos analgésicos de la morfina, un opioide muy utilizado, con la activación de las proteínas G, y ha relacionado la depresión respiratoria que a veces causa con la activación de una proteína reguladora llamada arrestina β.

La mayoría de los opiáceos, entre ellos todos los naturales, añade Christie, activan tanto la vía de la arrestina β como la de las proteínas G. Pero la bilorfina, un compuesto que los investigadores del nuevo estudio han creado a partir de los péptidos fúngicos, solo actúa sobre las proteínas G, explica Christie. «Es un gran paso, porque sabíamos que en farmacología todo el mundo busca opiáceos que no alteren la vía de la arrestina.» Ahora bien, Bohn y Christie coinciden en que hallar fármacos exentos de efectos secundarios requerirá de algo más que no tocar la vía de la arrestina β.

La bilorfina ya ha sido estudiada en ratones, pero solo mitigó las señales de dolor cuando se inyectó directamente en la médula espinal, lo cual significa que es incapaz de atravesar la barrera hematoencefálica. El objetivo es ahora diseñar derivados que penetren en el encéfalo pero conserven sus peculiares propiedades, esto es, que calmen el dolor sin paralizar la respiración.

—Stephani Sutherland



El hongo *Psilocybe cubensis*.

FORD MCCANN, SCIENCE SOURCE

BIOLOGÍA SINTÉTICA

Psilocibina producida por bacterias

Se ha modificado genéticamente *E. coli* para que sintetice esta sustancia terapéutica

El estudio de los alucinógenos fue durante décadas un tabú, pero en los últimos años drogas como la psilocibina, el principio activo de las «setas mágicas», han demostrado en ensayos clínicos sus posibilidades como tratamiento contra trastornos tales como la depresión o la adicción a la nicotina. El cultivo de los hongos dura meses y no es práctico de cara a la producción farmacéutica, en tanto que su síntesis química es costosa y laboriosa. Ahora se ha logrado genomodificar con éxito bacterias *Escherichia coli* para que fabriquen este alucinógeno.

Los microbios en cuestión generan hasta 1,16 gramos de psilocibina por litro de medio de cultivo. Se trata del mayor rendimiento obtenido hasta la fecha entre todos los organismos genéticamente modificados, diez veces superior al del segundo mejor resultado. Si se aumentase la escala, el nuevo método produciría cantidades suficientes para su uso terapéutico.

En comparación con los demás métodos, «la ventaja principal es su bajo coste», explica la autora del estudio, Alexandra Adams, estudiante del grado de ingeniería química en la Universidad Miami en Ohio. Además, «es más sencillo manipular *E. coli* que otros microorganismos».

Con la ayuda de otros colaboradores, modificaron las bacterias para que incorporasen tres genes del hongo *Psilocybe cubensis*, lo que hizo posible que sintetizasen la psilocibina a partir de una molécula precursora barata y de fácil obtención, el 4-hidroxiindol. A continuación, perfeccionaron el proceso para obtener la droga a mayor escala. Dieron a conocer sus resultados en diciembre en *Metabolic Engineering*.

Dirk Hoffmeister, microbiólogo farmacéutico en la Universidad Friedrich Schiller y responsable de un equipo que produjo la psilocibina con un hongo genomodificado, califica el estudio como «una alternativa interesante que demuestra la viabilidad de la idea» y deja patente «las posibilidades de la biología sintética». Con todo, las bacterias genomodificadas pueden sintetizar sustancias tóxicas o alergénicas que habría que eliminar mediante purificación, afirma Hoffmeister, ajeno al estudio novedoso. Según Adams, los fabricantes pueden eludir ese riesgo recurriendo a técnicas industriales aprobadas para medicamentos que ya son producidos por bacterias, como antibióticos o insulina.

El químico farmacéutico David Nichols de la Universidad Purdue, que tampoco ha participado en el trabajo, opina que el rendimiento de la técnica es impresionante. Pero señala que la estrategia exige el empleo de una sustancia de partida especial y que sería preferible fabricar la psilocibina a partir de precursores más sencillos. El autor principal del estudio, Andrew Jones, ingeniero químico y biológico en la Universidad de Miami, se ha marcado como meta sintetizarla a partir de la glucosa. Él y sus colaboradores negocian con varias empresas la concesión de licencias comerciales para el método ideado por el equipo.

Los efectos terapéuticos de la psilocibina se perciben en algunos casos desde la primera dosis, pero como son tantas las personas aquejadas por la depresión y otros trastornos mentales, el mercado potencial para este tipo de tratamientos es muy notable. «Si se aprobara para todo lo que se está investigando, podría tener como destinataria a una parte sustancial de la población», explica Jones.

—Tanya Lewis



PSICOLOGÍA

Confiar en los robots

La IA propicia una mejor cooperación a través de la impostura

Conforme los productos de la inteligencia artificial (IA) mejoren en su pretensión de pasar por humanos (como una voz generada mediante IA que tome las reservas para el restaurante por teléfono, o un asistente virtual que resuelva las dudas del consumidor conversando con él en línea), nos veremos inmersos cada vez más en la situación inquietante de no saber si estamos dialogando con una máquina. Parece ser que saber la verdad iría en detrimento de la eficacia de estos productos: investigaciones recientes han constatado contrapartidas entre la transparencia y la cooperación en las interacciones entre los humanos y los ordenadores.

En el estudio se recurrió a un juego sencillo pero sutil donde parejas de participantes tomaban una serie de decisiones simultáneas en las que decidían cooperar o engañar a su compañero. A la larga, lo más rentable es que ambos cooperasen, pero siempre había la tentación de optar por el engaño y ganar unos pocos puntos extra a corto plazo, a expensas del compañero. Los investigadores se sirvieron de un algoritmo de IA que, cuando se hacía pasar por una persona, utilizaba una estrategia que fue mejor que la empleada por los humanos a la hora de buscar la cooperación de un semejante. Pero trabajos precedentes indicaban que la gente tiende a desconfiar de las máquinas, por lo que se preguntaron qué sucedería si el robot se revelase como tal.

El equipo esperaba que las personas que jugaran a sabiendas con un robot reconocerían su capacidad para cooperar (sin ser manipulable) y dejarían de desconfiar en él. «Por desgracia, no lo conseguimos», afirma Talal Rahwan, especialista en computación de la Universidad de Nueva York en Abu Dabi y uno de los autores del artículo, publicado el último noviembre en *Nature Machine Intelligence*. «No importa lo que hiciese el algoritmo, la gente no dejó a un lado sus prejuicios.» Un robot que juegue sin ocultar que lo es tiene menos posibilidades de conseguir que las personas cooperen con él, por mucho que su estrategia resulte claramente más beneficiosa para ambos. (En cada modo, el robot jugó 50 partidas contra al menos 150 individuos.)

En otro experimento, se les dijo a los jugadores: «Los datos indican que a la gente le va mejor si trata al robot como si fuera una persona». No tuvo efecto alguno.

Virginia Dignum, que dirige el grupo de Inteligencia Artificial Ética y Social en la Universidad de Umeå y que no ha formado parte del estudio, alaba a los investigadores por explorar la contrapartida entre la transparencia y la eficacia, pero le gustaría verla sometida a prueba más allá del experimento del artículo.

Los autores afirman que, en la esfera pública, se le debe pedir a la gente su consentimiento para dejarse engañar por la identidad de un robot. No podrá ser un permiso que deba concederse con cada interacción, porque, de ser así, el «engaño» no funcionaría. Pero la autorización general para el engaño ocasional, aunque se pueda obtener, suscita dilemas éticos. Dignum cree que la gente debe poder saber que ha interaccionado con un robot, aunque matiza que si ella llamase a un servicio de atención al cliente con una pregunta sencilla «solo desearía obtener una respuesta». —*Matthew Hutson*

QUÍMICA

Nueva síntesis de plásticos

Un componente esencial podría fabricarse a partir de fuentes de carbono existentes

El etileno es el producto químico industrial más demandado del mundo. Los consumidores y los fabricantes requieren 150 millones de toneladas cada año, la mayoría de las cuales acaban convertidas en innumerables productos plásticos que pasan a formar parte de aparatos electrónicos o de tejidos, entre otros. Para obtenerlo, las industrias petroquímicas descomponen los hidrocarburos del gas natural en un proceso que consume enormes cantidades de calor y energía y que contribuye a las emisiones responsables del cambio climático.

En fecha reciente se ha logrado sintetizar el etileno combinando dióxido de carbono gaseoso con agua y moléculas orgánicas sobre la superficie de un catalizador de cobre en el seno de un electrolizador, un aparato que acelera las reacciones químicas con ayuda de la electricidad. Descrito el pasado noviembre en la versión en línea de *Nature*, el proceso podría abrir el camino hacia el aprovechamiento del dióxido de carbono como materia prima para la fabricación de productos químicos y de posibles combustibles, lo cual reduciría a la par nuestra dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones industriales de carbono.

El descubrimiento arranca del trabajo publicado el año pasado por Ted Sargent, ingeniero de la Universidad de Toronto, que describía un proceso similar que requirió más electricidad y, en general, fue menos eficiente. De modo que Sargent buscó la ayuda de investigadores del Instituto de Tecnología de California, quienes son «cinturones negros en el diseño y la síntesis de moléculas».

Los químicos del Caltech Jonas Peters y Theodor Agapie y sus colaboradores experimentaron con moléculas orgánicas que pudieran ser incorporadas al catalizador de cobre. La candidata perfecta resultó ser una sal de arilpiridinio, explica Sargent: sobre el cobre formó una película insoluble en agua que orientaba las moléculas de dióxido de carbono de tal modo que estas reaccionaban más fácilmente entre sí, sin ralentizar la reacción. Se generaba así más etileno, con menos subproductos, como el metano o el hidrógeno.

Con todo, el proceso tendrá que ganar en eficiencia antes de ser comercializado y tomar el carbono de instalaciones que lo generen, como las centrales eléctricas de gas o carbón. La reducción de los costes energéticos, algo ya posible con las fuentes de energía renovables como la eólica, también contribuiría a su viabilidad.

«Se trata de un avance importante», según Randy Cortright, asesor de investigación en el Laboratorio Nacional de Energías Renovables en Golden, Colorado, ajeno al estudio. En su opinión, el resultado «va a interesar a muchísima gente, que podrá tomarlo como punto de partida para la mejora».

—*Susan Cosier*

THOMAS FUCHS

NEUROBIOLOGÍA

El circuito del ansia

Las ratas modifican el comportamiento compulsivo cuando se les ajusta una conexión cerebral

Para muchas personas que luchan contra las adicciones, contemplar los objetos relacionados con el consumo de drogas, o incluso los lugares en que las adquirieron o consumieron en el pasado, puede desatar un ansia que precipite la recaída. Asociar los estímulos ambientales con experiencias gratificantes constituye una forma básica de aprendizaje, pero algunos investigadores creen que tales asociaciones pueden adueñarse del comportamiento y empeorar los problemas como la adicción y los trastornos alimentarios.

Un equipo de investigadores dirigido por la neurocientífica Shelly Flagel, de la Universidad de Michigan, ha descubierto un circuito cerebral que podría controlar esa apropiación; las ratas que exhiben un tipo de conducta compulsiva muestran una conectividad y actividad cerebrales diferenciadas, y la manipulación del circuito alteró su conducta. Tales hallazgos podrían ayudar a entender por qué algunas personas son más proclives a no controlar los impulsos. «Se trata de un estudio impecable desde el punto de vista técnico», asegura el neurocientífico Jeff Dalley, de la Universidad de Cambridge, ajeno al trabajo.

En la publicación del estudio que tuvo lugar el pasado septiembre en *eLife*, explican que mostraron a las ratas una palanca inmóvil poco antes de darles una recompensa apetitosa a través de un conducto, tras lo cual las separaron en grupos según su respuesta. Todas supieron vincular la palanca con la recompensa, pero algunas, denominadas «seguidoras del objetivo», comenzaron a acercarse al conducto del alimento directamente después de ver la palanca, mientras que las «seguidoras del indicador» volvían compulsivamente a la palanca.

El equipo sospecha que intervienen dos regiones cerebrales: el núcleo paraventricular del tálamo (PVT), que dirigiría el comportamiento, y la corteza prelímbica, que intervendría en el aprendizaje por recompensa. Por medio de una técnica denominada quimiogenética, alteraron las neuronas del circuito que enlaza ambas regiones, lo que les permitió activar o inhibir las señales procedentes de la corteza prelímbica por medio de fármacos. La activación del circuito redujo la tendencia de las seguidoras del indicador a acercarse a la palanca, pero no afectó a las seguidoras del objetivo. La inhibición incitó a las seguidoras del objetivo a acercarse a la palanca (conducta de seguimiento del indicador), sin que afectase a las que ya prestaban atención a ella desde el inicio. El equipo también halló un aumento de la dopamina en el cerebro de las nuevas seguidoras del indicador, un neurotransmisor implicado en el procesamiento de la recompensa.

La corteza prelímbica parece ejercer un control descendente, mientras que el PVT procesa la señal motivadora desencadenada por el estímulo. «Los individuos parecen poseer neurocircuitos distintos en lo tocante a este equilibrio entre el control cortical descendente y los procesos subcorticales ascendentes, que son más emocionales», aclara Flagel. «Los que reaccionan intensamente a los estímulos ambientales podrían sufrir deficiencias en el control descendente.» Y plantea que las terapias cognitivas de entrenamiento podrían combatir tales carencias en el ser humano.

El circuito también supondría una nueva diana terapéutica, pero no se conoce la ubicación exacta en el cerebro humano, señala Dalley, por no decir que la adicción es más compleja que este solo mecanismo.

Como paso siguiente, intentarán examinar esos rasgos en personas. «Una vez que hayamos establecido el paradigma del seguidor del objetivo y del indicador en la especie humana, podremos estudiar si esos rasgos predicen la presencia de una psicopatología. Esperamos que ello ayude a reconocer a las personas más proclives a padecer ciertos trastornos mentales o a recaer en ellos», explica Flagel.

—*Simon Makin*

KTSDESIGN, GETTY IMAGES (*cerebro*); NASA (*Estación espacial MIR*)

AGENDA

CONFERENCIAS

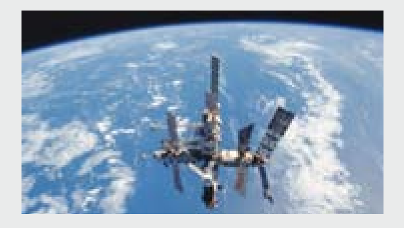
3, 10, 17 y 24 de febrero — Ciclo
Nuestro cerebro, ese gran desconocido
Charlas en bibliotecas públicas impartidas por expertos en el campo
Barcelona
ajuntament.barcelona.cat/biblioteques

4 de febrero
Aplicaciones de realidad virtual e inteligencia artificial para estudiar el pasado
Juan Antonio Barceló
Universidad Autónoma de Barcelona
Museo Arqueológico Nacional, Madrid
www.man.es

15 de febrero
Dos ojos y una ~~misión~~ visión… estereoscópica
José Juan Castro Torres, Universidad de Granada
Parque de las Ciencias, Granada
www.parqueciencias.com

EXPOSICIONES

Una MIRada al espacio
Museo de la Ciencia y de la Técnica de Cataluña
Tarrasa
mnactec.cat



OTROS

Durante todo el mes
Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia
Numerosas actividades en todo el territorio nacional
11defebrero.org

15 de febrero – Taller infantil
¡De mayor seré bioquímica, como Margarita!
Para niños de entre 6 y 11 años
Museo del Jurásico de Asturias
Colunga
www.museojurasicoasturias.com

Hasta el 20 de febrero (inscripciones)
Reacciona!
Concurso multimedia para estudiantes de secundaria
Convoca: Real Sociedad Española de Química (sección territorial de Valencia)
www.cac.es

REPRODUCCIÓN HUMANA

Un modelo de implantación del embrión

Un novedoso dispositivo microfluídico remeda los fenómenos que experimenta el embrión al implantarse en la pared del útero

AMANDER T. CLARK



GETTY IMAGES/CHRISTOPH BURGSTEDT/ISTOCK

EMBRIÓN EN LA PARED DEL ÚTERO: Conocer mejor los procesos celulares que experimenta el embrión durante su implantación en el útero ayudará a identificar algunas causas de los abortos tempranos.

Millones de mujeres sufren abortos tempranos cada año en el mundo. La mayoría de ellos ocurre en el primer trimestre del embarazo, en torno al momento en que el embrión se implanta en el epitelio uterino. No saber por qué algunas de estas gestaciones se malogran resulta frustrante para las mujeres y sus parejas. Para dar respuesta a este importante interrogante, se precisan modelos de implantación del embrión humano. Ahora, Yi Zheng, de la Universidad de Michigan, y sus colaboradores han descrito en *Nature* un modelo avanzado de desarrollo embrionario humano que reproduce, experimentalmente, muchos de los fenómenos clave que suceden alrededor de ese momento (es decir, durante la fase de periimplantación).

Células ordenadas en el embrión

El modelo implica la generación de estructuras sintéticas semejantes al saco embrionario (que, en una etapa ulterior, se transformará en la bolsa de las aguas, o saco amniótico, y el embrión). Supone un notable avance sobre los prometedores modelos concebidos anteriormente por este grupo y otros autores porque muestra la coordinación espacial de los procesos de diferenciación celular ocurridos en el embrión humano en torno al momento de implantarse. Estos acontecimientos son la formación del saco amniótico y, en su interior, un disco celular llamado epiblasto; la diferenciación inicial de las células germinales primordiales (las que derivarán en espermatozoides u óvulos); y el comienzo de la gastrulación, esto es, el proceso por el que el epiblasto da lugar a las tres capas germinales (ectodermo, mesodermo y endodermo) que formarán el feto.

La ventaja esencial del nuevo modelo es que no precisa recurrir a embriones humanos íntegros ni a sistemas de cultivo para la adhesión embrionaria in vitro. En su lugar, se basa en un sencillo dispositivo microfluídico y en la diferenciación de las células pluripotentes, que son capaces de transformarse en cualquier tipo celular del organismo. Estas pueden extraerse de embriones humanos (células madre embrionarias, CME) u obtenerse mediante la conversión de células humanas diferenciadas (células madre pluripotentes inducidas, CMPI).

Las células madre pluripotentes (CME y CMPI) humanas que se cultivan en con-

diciones normales en el laboratorio son molecularmente equivalentes a las del embrión en fase temprana, a punto de comenzar la gastrulación. Así, es posible reproducirlas indefinidamente en este estado en incubadoras de cultivo tisular o bien crioconservarlas en nitrógeno líquido para descongelarlas y volver a cultivarlas años después.

En la actualidad, las CME y las CMPI se emplean de varios modos para estudiar los diversos tipos celulares que componen los embriones y fetos humanos. Si se deja que se diferencien espontáneamente, generan unos conglomerados celulares denominados cuerpos embrioides. Otra posibilidad es dirigir su diferenciación incubándolas con ciertas mezclas de factores de crecimiento para crear modelos tridimensionales simplificados de determinados órganos fetales o capas germinales. Las estirpes de CMPI procedentes de pacientes permiten elaborar modelos de enfermedades «en una placa de cultivo». Con estos métodos se obtienen los mismos tipos celulares que se hallan en el embrión en fase avanzada y en el feto; sin embargo, en estos modelos, la diferenciación inicial de las capas germinales se produce de manera desordenada, que en nada recuerda a la organización espacial con la que se diferencian los embriones humanos durante la implantación. En consecuencia, no han sido demasiado útiles para estudiar la fase de periimplantación de la gestación humana.

El dispositivo

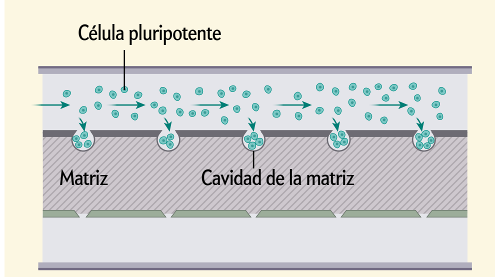
Para crear un entorno tridimensional en el que las células madre formasen estructuras sacciformes de tipo embrionario, Zheng y su grupo construyeron un dispositivo microfluídico dotado de tres canales: uno central para incorporar el material de la matriz, otro para cargar las CME o CMPi y un tercero por el que fluía líquido con morfógenos (moléculas que inducen la diferenciación de las células madre). Gracias a su diseño con filas de postes trapeciales situados a 80 micras de distancia, se generaban cavidades de matriz distribuidas uniformemente en las que las células madre pudieran proliferar y diferenciarse.

Introdujeron células madre en el dispositivo y 18 horas después bombearon líquidos con morfógenos en el canal de fluido, a un lado, o en el canal de carga de células, al otro. A las 36 horas, en todos los receptáculos se habían formado estructuras organizadas en tres dimensiones que remedaban el saco embrionario humano durante la periimplantación. Además, se sirvieron de distintos morfógenos para inducir su anteriorización o posteriorización, es decir, la aparición de características propias de los extremos anterior o posterior del embrión normal. Sin embargo, estas estructuras no se anteriorizaron y posteriorizaron simultáneamente, una condición imprescindible para que el embrión continúe desarrollándose.

En los sacos posteriorizados, de poco más de 100 micras de diámetro, los investigadores distinguieron: poblaciones celulares semejantes a las de la membrana amniótica (que reviste las paredes de la bolsa de las aguas) en fase de desarrollo; una línea primitiva posterior (que es la base de la simetría bilateral del cuerpo); células de tipo mesodérmico; y, lo que resulta sorprendente, células similares a las germinales primordiales. En los sacos anteriorizados, observaron células análogas a las de la línea primitiva anterior y a las del endodermo. Así pues, este es uno de los primeros modelos humanizados con los que estudiar la pasmosa complejidad de las relaciones espaciales intercelulares en la ventana periimplantatoria.

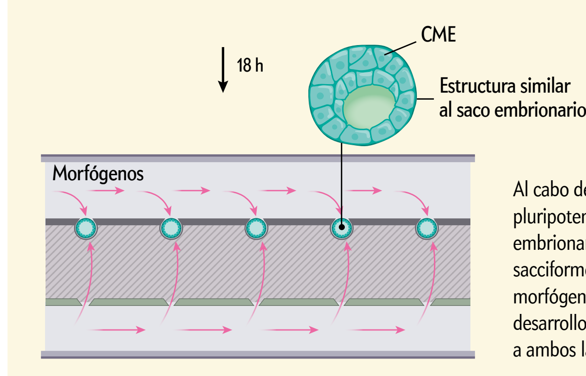
IMPLANTACIÓN EN EL LABORATORIO

SE HA MODELIZADO el desarrollo de un embrión humano tras su implantación en un dispositivo microfluídico. El avance permitirá conocer mejor esta fase embrionaria e incluso algunas causas de los abortos tempranos.



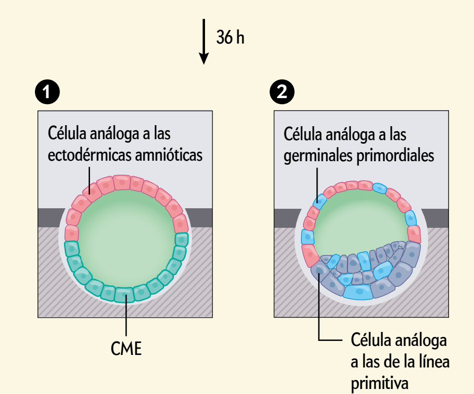
El dispositivo consta de tres canales: uno para cargar las células, otro relleno de una matriz y un tercero de inducción, por el que se bombean morfógenos (moléculas que actúan sobre el desarrollo y el crecimiento). Las células pluripotentes que se introducen en el canal de carga se asientan en las cavidades de la matriz.

18 h



Al cabo de 18 horas, las células pluripotentes (en este caso, células madre embrionarias CME) forman estructuras sacciformes similares al embrión. Los morfógenos bombeados influyen en el desarrollo de las células pluripotentes a ambos lados de cada saco.

36 h



Después de 36 horas, los sacos muestran características de los extremos anterior (1) o posterior (2) del embrión. Ambos tipos de sacos contienen células análogas a las que formarán la membrana amniótica (ectodérmicas amnióticas); los posteriorizados presentan también células análogas a las germinales primordiales y a las de la línea primitiva posterior (base de la simetría bilateral).

© NATURE

¿Embriones viables?
A estas alturas, los lectores se preguntarán si estas estructuras parecidas al saco embrionario son verdaderos embriones humanos. Pueden considerarse imitaciones, pero es importante destacar que no son viables (nunca evolucionaron hasta un feto normal) y no poseen ciertos componentes esenciales, como un endodermo primitivo y una capa celular trofoblástica, necesarios para la formación de la placenta y otras membranas que rodean al embrión.

El modelo también plantea la cuestión de la norma de los 14 días: el consenso reconocido internacionalmente de no prolongar el cultivo de embriones humanos íntegros más allá de 14 días o hasta la formación de la línea primitiva, lo que suceda antes. En este estudio se formaron células equiparables a las de las líneas primitivas anterior o posterior, lo que permitió investigar los fenómenos de transmisión de señales celulares que tienen lugar en este proceso. No obstante, en mi opinión, un embrión humano íntegro se crea mediante la fecundación de un óvulo por un espermatozoide y la consiguiente formación de las estirpes celulares embrionarias y de las células que rodean al embrión, pero este no es el caso de las estructuras que nos ocupan.

Por otra parte, la norma de los 14 días se estableció para evitar el desarrollo de embriones hasta etapas en las que llegaran a ser sensibles o sentir dolor, lo que no pudo suceder en este modelo porque no se diferenciaron células anteriores y posteriores a la vez y, aunque no se comprobó, es improbable que se hubieran formado neuronas sensitivas. Por consiguiente, en sentido estricto, cabe excluir el modelo microfluídico de Zheng de la norma de los 14 días, pues no se trata de embriones íntegros tal como se considera a los donados para la investigación por las clínicas de fecundación in vitro. Ahora bien, conviene valorar los aspectos éticos de la experimentación con estructuras semejantes al saco embrionario humano durante más de 14 días, con especial atención a la posibilidad de que en algún momento se las deba considerar seres humanos.

Por último, animo a las autoridades normativas a que contemplen este dispositivo como una adición útil al conjunto de recursos de células madre humanas, ya que abre la puerta al estudio de un período del desarrollo embrionario humano inaccesible hoy en día a la investigación in vivo. Producido a gran escala para elevar su rendimiento, el modelo resultaría inestimable en el campo de la toxicología ambiental. Por ahora, solo es posible estudiar estas estructuras en el dispositivo durante un plazo relativamente breve: la mayoría se malogran en pocos días. Si en el futuro se consigue prolongar su cultivo, podrían aportar nueva información valiosa sobre el desarrollo embrionario que nos permita comprender mejor o incluso evitar el aborto temprano que sufren millones de mujeres en todo el mundo.

Amander T. Clark *trabaja en el Departamento de Biología Molecular, Celular y del Desarrollo y en el Centro de Investigación de Células Madre de la Universidad de California en Los Ángeles.*

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 573, págs. 350-351, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Self-organization of the in vitro attached human embryo. Alessia Deglincerti et al. en *Nature*, vol. 533, págs. 251–254, mayo de 2016.
Addressing the ethical issues raised by synthetic human entities with embryo-like features. John Aach et al. en *eLife*, n.° e20674, marzo de 2017.
Controlled modelling of human epiblast and amnion development using stem cells. Yi Zheng et al. en *Nature*, vol. 573, págs. 421–425, septiembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Implantación del embrión en la fecundación in vitro. Óscar Berlanga en *IyC*, noviembre de 2012.
Biomicrofluídica, una nueva herramienta para la investigación biomédica. José María Ayuso Domínguez y María Virumbrales Muñoz en *IyC*, enero de 2016.

FÍSICA FUNDAMENTAL

Una nueva explicación para la energía oscura

Suponer que el espaciotiempo presenta un tipo concreto de estructura granular permite predecir el valor empírico de la energía oscura. La idea apunta a una insospechada conexión entre la gravedad y el problema de la medida en mecánica cuántica

DANIEL E. SUDARSKY SAIONZ

Cuando en 1915 Albert Einstein propuso la relatividad general (la teoría que describe la gravedad en términos de la geometría del espaciotiempo), ya venía gestándose la otra gran revolución de la física moderna: la mecánica cuántica. Sin embargo, un siglo después aún seguimos sin encontrar un esquema completamente satisfactorio que unifique ambos paradigmas. Ello se debe, en parte, a la tensión existente entre sus principios básicos, un aspecto que queda ejemplificado por la estricta localidad de la relatividad general y la no localidad intrínseca de la mecánica cuántica, identificada por John Bell en 1964 al analizar las correlaciones de partículas entrelazadas.

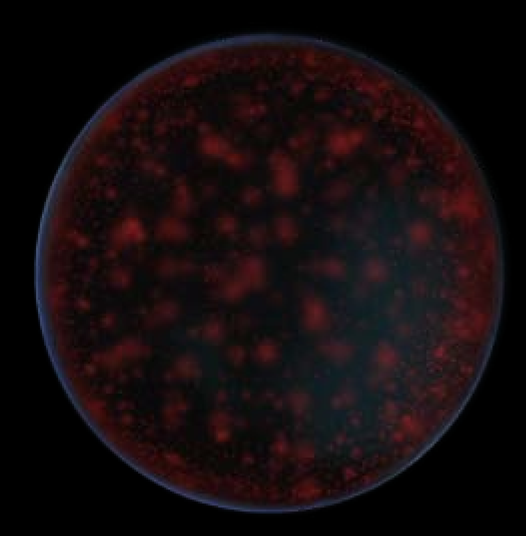
Por otro lado, y con independencia de las tiranteces que puedan existir entre ambas teorías, cabe señalar que cada una de ellas adolece de sus propios problemas por separado. La relatividad general predice de manera genérica la aparición de singularidades: regiones del espacio y el tiempo donde la teoría pierde su validez. Por su parte, la mecánica cuántica sufre una de-

DOS HIPÓTESIS SOBRE LA ENERGÍA OSCURA

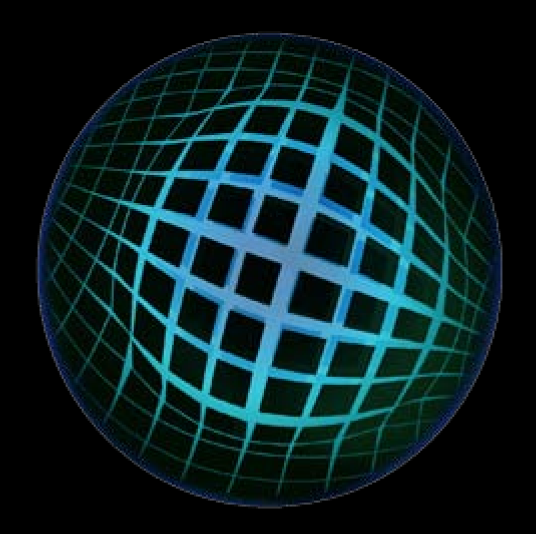
EN 1998 LOS FÍSICOS DESCUBRIERON que, contra todo pronóstico, el universo actual no solo se expande, sino que lo hace a una velocidad cada vez mayor. El agente causante de esa enigmática aceleración se conoce como «energía oscura». Descifrar su naturaleza constituye uno de los mayores retos a los que se enfrenta la física fundamental.

La hipótesis más estudiada postula que la energía oscura corresponde a la energía inherente al espacio vacío (*izquierda*). Sin embargo, el cálculo de esta cantidad arroja un valor muy diferente del que asignan las observaciones a la densidad de energía oscura.

Un modelo reciente ha propuesto que los mismos efectos podrían deberse a la estructura granular del espaciotiempo a escala microscópica (*derecha*). Al contrario que la hipótesis tradicional, esta propuesta sí permite predecir correctamente la densidad observada de energía oscura.



ESPACIOTIEMPO SUAVE CON INDETERMINACIONES CUÁNTICAS
La teoría cuántica de campos describe el vacío como un estado que minimiza las distintas contribuciones a la energía. Sin embargo, las indeterminaciones cuánticas (*rojo*) impiden que todas esas contribuciones se anulen. Ello da lugar a una energía del vacío distinta de cero, la cual podría causar la expansión acelerada del universo .



ESPACIOTIEMPO «RUGOSO»
Sin embargo, el mismo efecto podría obedecer a una estructura granular del espaciotiempo (*azul*). Esta sería tal que causaría pequeñas violaciones del principio de conservación de la energía. Acumuladas a escalas cósmicas, esas violaciones ejercerían un efecto indistinguible del que usualmente se atribuye a la energía oscura.

ARIADNA GEA

ficiencia conceptual muy seria conocida como «problema de la medida». En términos simplificados, esta aparece porque la teoría postula dos tipos de leyes muy distintas para describir la evolución de un sistema físico, dependiendo de si este se encuentra bajo observación o no. Sin embargo, la teoría no deja claro en ningún momento qué tipo de interacción cuenta exactamente como observación. Los múltiples enfoques que se han propuesto para intentar resolver esta cuestión siguen siendo objeto de fuertes controversias.

Una pregunta natural es si las tensiones que afectan a estos dos pilares de la física moderna podrían estar relacionadas. En una serie de trabajos recientes publicados junto con Alejandro Perez y Thibaut Josset, de la Universidad de Aix-Marsella, y James D. Bjorken, de Stanford, hemos obtenido resultados que podrían apuntar en esa dirección. La conexión parece provenir de otro de los grandes misterios de la física contemporánea: la energía oscura, el enigmático agente responsable de la expansión acelerada del universo. En concreto, una nueva hipótesis sobre la estructura microscópica del espacio y el tiempo proporciona una explicación plausible sobre el origen de la energía oscura y, al mismo tiempo, permite predecir correctamente su valor empírico.

¿Gravita el vacío?

La teoría cuántica y la relatividad general han alcanzado éxitos más que notables. La primera nos ha dado la electrónica moderna y nos ha permitido entender no solo la estructura atómica, sino (en su versión adaptada a la relatividad especial, la teoría cuántica de campos) casi la totalidad de la física de partículas. Por su parte, la relatividad general ha llevado a predecir desde fenómenos como los agujeros negros y las ondas gravitacionales hasta el comportamiento preciso de los dispositivos GPS. Sin embargo, puede que su ámbito de mayor impacto haya sido la cosmología. Hablar de la dinámica del universo como un todo resulta casi impensable sin relatividad general.

Fue aquí donde Einstein cometió el que, al parecer, acabaría calificando más tarde como el «mayor error» de su vida. La relatividad general implica que el universo no puede ser estático, sino que debe evolucionar con el tiempo. Sin embargo, la idea de un cosmos cambiante contradecía los indicios disponibles a principios del siglo xx, por lo que Einstein modificó la teoría agregando un término a sus ecuaciones básicas. Dicho término, conocido como constante cosmológica, ejerce un efecto similar a una «gravedad repulsiva» y hace posible que un universo estático

aparezca como solución de las ecuaciones correspondientes.

No obstante, pocos años después de que Einstein modificase la teoría original, el astrónomo Edwin Hubble analizó el movimiento de las galaxias distantes y llegó a la conclusión de que nuestro universo no es estático, sino que se expande. Como consecuencia, la constante cosmológica introducida por Einstein dejó de ser necesaria. A pesar de ello, los físicos nunca olvidaron por completo la idea, ya que dicho término parecía tener cabida de manera muy natural en la teoría.

En efecto, la constante cosmológica puede interpretarse como la densidad de energía asociada al espacio vacío. Pero, dado que la relatividad general funciona muy bien sin constante cosmológica, esta solo puede tomar un valor diminuto para resultar compatible con las observaciones. El problema radica en que, al tratar de estimar el valor de la energía del vacío a partir de primeros principios, se obtiene un valor 10^{120} veces mayor de lo aceptable. Ante esta situación, la mayoría de los físicos concluyeron que debía existir algún principio fundamental de la naturaleza que obligaba a que la energía del vacío fuese exactamente cero.

Gravedad unimodular

Una de las maneras de formular una teoría que evite el problema de la energía del vacío pasa por considerar cierta modificación de la relatividad general conocida como «gravedad unimodular». Esta teoría sufre el inconveniente de que la ley de conservación de la energía no emana de ella de manera directa (como sí ocurre en relatividad general), sino que debe introducirse como postulado adicional. Sin embargo, tal y como enfatizó Steven Weinberg en los años ochenta, en la gravedad unimodular el vacío no gravita, lo que evita el desastre de las estimaciones que le asignan una densidad de energía 10^{120} veces mayor de lo permitido.

El asunto tomó un cariz bastante más problemático en 1998. Aquel año, diversas observaciones astronómicas revelaron que nuestro universo no solo se expande, sino que lo hace cada vez más rápido. Algo así es justo lo contrario de lo que cabría esperar, ya que, en principio, la atracción gravitatoria entre galaxias debería frenar la expansión cósmica, no acelerarla. Una vez más, la explicación más natural era la constante cosmológica de Einstein y el «efecto repulsivo» que esta implica sobre el movimiento de las galaxias.

Sin embargo, ahora su valor se convierte en un gran misterio. Ni es enorme, como indican las estimaciones basadas en la energía del vacío, ni es exactamente cero, como sugieren varios enfoques alternativos. De hecho, hoy sabemos que la densidad de energía asociada a la constante cosmológica equivale a unos 7×10^{-30} gramos por centímetro cúbico: un valor diminuto (en comparación, piense que la densidad del agua es de un gramo por centímetro cúbico) pero que, al sumarlo sobre todo el universo, da cuenta del 70 por ciento de su contenido energético total. Esta situación llevó a postular una enorme cantidad de nuevas teorías, al tiempo que el fenómeno causante de la expansión acelerada del cosmos pasó a denominarse con el término más genérico de «energía oscura».

¿Se conserva la energía?

Por otro lado, existen varios indicios que llevan a cuestionarse la exactitud de la ley de conservación de la energía. Por supuesto, en caso de que hubiese violaciones de dicha ley, estas tendrían que ser minúsculas, ya que de lo contrario las habríamos observado en los experimentos. Con todo, no es necesario que esta ley sea estrictamente válida.

Entre las razones para dudar de ella se cuentan algunas de las soluciones propuestas al problema de la medida en mecánica cuántica. Las teorías que postulan el llamado «colapso espontáneo» de la función de onda (ciertas modificaciones de la teoría cuántica tradicional que resuelven la ambigüedad mencionada más arriba sobre las distintas leyes de evolución de los sistemas físicos) llevan de manera genérica a violaciones de la ley de conservación de la energía.

En paralelo, varios de los caminos propuestos para formular una teoría cuántica del espaciotiempo sugieren que, a un nivel fundamental, este no tendría un carácter continuo, sino que presentaría algún tipo de granularidad. De ser el caso, podemos imaginar el espaciotiempo como una superficie rugosa que «frenaría» el movimiento de las partículas, lo que daría lugar a pequeñas violaciones de la ley de conservación de la energía.

El aspecto clave reside en que una violación de este tipo, no importa lo pequeña que sea, resulta incompatible con las ecuaciones básicas de la relatividad general. Sin embrago, no ocurre lo mismo con la gravedad unimodular. Como indicábamos antes, en esta teoría, la conservación de la energía no aparece como un resultado, sino que debe imponerse desde el principio como un postulado más.

Hace unos dos años, junto con Perez, Josset y más tarde con Bjorken, decidimos explorar el postulado opuesto: ¿qué ocurriría si la ley de conservación de la energía no fuese válida en un sentido estricto? Lo que observamos fue que, bajo ciertas condiciones, la gravedad unimodular no solo podía acomodar este tipo de violaciones, sino que, además, se generaba un efecto prácticamente indistinguible del asociado a la energía oscura.

Los ladrillos del espaciotiempo

En nuestros trabajos de 2018 y 2019 con Perez y Bjorken nos propusimos calcular la dispersión de energía asociada a una hipotética granularidad del espaciotiempo. En concreto, consideramos un tipo de granularidad que solo se tornaría aparente cuando el espaciotiempo se curvase (es decir, en presencia de materia y energía), pero que pasaría inadvertida cuando la geometría del espaciotiempo fuese «plana» (sin curvatura). Aunque nuestro universo tiene cuatro dimensiones (tres dimensiones espaciales más el tiempo), a modo de analogía bidimensional podemos pensar en una pared de azulejos. Si la pared es plana, no notaremos las baldosas (suponiendo que sus aristas encajen a la perfección). En cambio, si es curva, los bordes de los azulejos resultarían imposibles de ocultar. Al deslizar nuestra mano, sentiríamos las aristas como obstáculos que impedirían un movimiento suave.

En este espaciotiempo granular, procedimos a buscar una expresión que describiera el movimiento de una partícula y que nos permitiese evaluar cuáles serían sus desviaciones con respecto a las predicciones de la relatividad general. Semejante expresión debía quedar caracterizada por un parámetro no muy diferente de 1, al que denominamos α; por la masa y el espín de la partícula; por la curvatura del espaciotiempo, y por el estado de movimiento de la materia circundante.

Para nuestra sorpresa, esos requisitos nos llevaron a una expresión prácticamente única que nos permitía estimar la tasa de pérdida de energía. Y junto a las ecuaciones de la gravedad unimodular, ello nos proporcionaba una fórmula para la constante cosmológica que, al evaluarla, resultó arrojar precisamente el orden de magnitud observado. En otras palabras: nuestra hipótesis sobre la estructura granular del espaciotiempo po-

ría estar explicando no solo la naturaleza y el origen de la energía oscura, sino también su magnitud.

Vale la pena señalar que las desviaciones con respecto a la conservación de la energía que surgen de nuestra propuesta resultan demasiado pequeñas para poder observarlas directamente, al menos con la tecnología actual. Sin embargo, en el marco de la gravedad unimodular, dichas violaciones se acumulan durante la evolución del universo. La constante cosmológica sería entonces una especie de «recuerdo» acumulado de las violaciones de la conservación de la energía a lo largo de toda la historia del cosmos (si bien el efecto dominante parece provenir de una época temprana en la que el universo observable era unas 10^{15} veces menor que en la actualidad).

Aunque todo esto parece muy prometedor, todavía quedan varias cuestiones por aclarar. Por ejemplo, hemos mencionado que las violaciones de la ley de conservación de la energía pueden ser de dos tipos: las debidas a ciertas modificaciones de la mecánica cuántica concebidas para resolver el problema de la medida, y las asociadas a la granularidad del espaciotiempo. ¿Podrían una y otra ser dos caras de la misma moneda? Por otro lado, sería de gran interés hallar otros efectos ligados a esta idea cuya comprobación experimental nos permitiese corroborarla o desecharla. Todo indica que, en el mejor de los casos, apenas estamos comenzando a entender estos misterios. Pero, a su vez, esta notable conexión entre la energía oscura y la granularidad del espaciotiempo sugiere que es probable que todos ellos estén interconectados.

Daniel E. Sudarsky Saionz
es físico teórico del Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México

PARA SABER MÁS

The cosmological constant problem. Steven Weinberg en *Reviews of Modern Physics*, vol. 61, págs. 1-23, enero de 1989.
Dark energy from violation of energy conservation. Thibaut Josset, Alejandro Perez y Daniel Sudarsky en *Physical Review Letters*, vol. 118, art. 021102, enero de 2017.
A microscopic model for an emergent cosmological constant. Alejandro Perez, Daniel Sudarsky y James D. Bjorken en *International Journal of Modern Physics D*, vol. 27, art. 1846002, julio de 2018.
Dark energy from quantum gravity discreteness. Alejandro Perez y Daniel Sudarsky en *Physical Review Letters*, vol. 122, art. 221302, junio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

El rompecabezas de la energía oscura. Adam Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.
El problema de la mecánica cuántica. Steven Weinberg en *IyC*, agosto de 2017.
Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica. Miguel Zumalacárregui Pérez en *IyC*, junio de 2018.

MEDICINA

Un nuevo fármaco contra las helmintiasis

Su doble mecanismo de acción lo convierte en un tratamiento prometedor contra estas enfermedades tropicales desatendidas

MARÍA JOSÉ DE ROSA, MARÍA GABRIELA BLANCO Y DIEGO RAYES

Los helmintos son gusanos parásitos que se transmiten a través del suelo, el agua o los alimentos y afectan a los humanos, los animales y las plantas. Se distinguen dos grupos principales, según la forma del cuerpo: los platelmintos (planos) y los nematodos (cilíndricos). Todos ellos causan diversas enfermedades que tienen un impacto devastador en la calidad de vida humana y producen grandes pérdidas económicas en el sector agrícola y ganadero.

La Organización Mundial de la Salud estima que alrededor del 25 por ciento de la población mundial está infectada por helmintos transmitidos a través del suelo. Esta se concentra en las zonas tropicales y subtropicales, especialmente en el África subsahariana, América, China y Asia oriental. Más de 267 millones de niños en edad preescolar y más de 568 millones en edad escolar habitan en regiones donde existe una intensa transmisión de esos parásitos. En la mayoría de los casos, corresponden a países pobres, donde el acceso al agua potable resulta deficiente o apenas existen infraestructuras para la eliminación de desechos cloacales. Las consecuencias de las parasitosis resultan particularmente graves en los niños, dado que alteran el crecimiento, el estado nutricional, la capacidad cognitiva y el rendimiento escolar, entre otros efectos.

Pero, a pesar de la alta prevalencia de esas enfermedades, el desarrollo de fármacos antiparasitarios no es un objetivo atractivo para la industria farmacéutica. Una razón podría deberse a que, si bien los helmintos ocasionan síntomas importantes (como diarrea, dolor abdominal, anemia, debilidad), en general no representan una amenaza para la vida de la persona, lo que lleva a las grandes compañías a priorizar el desarrollo de fármacos destinados a otros ámbitos de la salud. Otra razón es que la mayoría de los países perjudicados disponen de escaso dinero e infraestructuras para poder dedicarlos al descubrimiento y la investigación de nuevas terapias.

En la actualidad, el número de antihelmínticos (fármacos contra los helmintos) disponibles resulta muy limitado. La mayoría de ellos se desarrollaron primero para uso veterinario, debido a las cuantiosas pérdidas en el rendimiento agropecuario y ganadero que estos ocasionan. Sin embargo, el uso frecuente y a veces inapropiado de estos fármacos ha generado la aparición de parásitos resistentes. La resistencia a los tratamientos es una preocupación creciente en el campo de las enfermedades infecciosas y representa una amenaza para la producción agrícola y para la salud animal y humana. A pesar de esta adversa situación, en los últimos treinta años solo se ha desarrollado un antihelmíntico: la tribendimidina. En 2013, el grupo dirigido por Shu-Hua Xiao, del Instituto Nacional de Enfermedades Parasitarias, en Shanghái, realizó ensayos clínicos con este fármaco.

Para contribuir al desarrollo de nuevos antiparasitarios, en nuestro laboratorio estamos evaluando la actividad antihelmíntica de varios compuestos derivados del imidazol. Nos fijamos en él porque varios de sus derivados presentan importantes propiedades farmacológicas: entre ellas, actividad antivírica, antibacteriana e incluso anticancerosa. De modo que nos propusimos averiguar si también permitía tratar las enfermedades provocadas por helmintos.

Hallar un antiparasitario eficaz

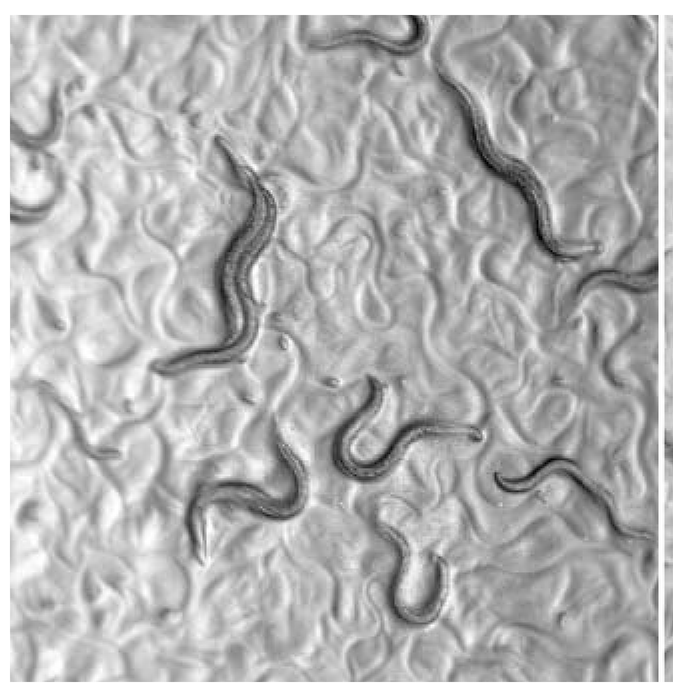
Investigar el efecto de un medicamento contra gusanos parásitos presenta dos limitaciones. En primer lugar, los parásitos resultan difíciles de cultivar en el laboratorio porque necesitan un hospedador donde llevar a cabo su ciclo biológico. En segundo lugar, todavía no existen herramientas moleculares de manipulación genética adaptadas a estos animales. (Las modificaciones genéticas permiten identificar las moléculas sobre las que actúan los fármacos: si se anula la expresión de un gen que codifica un receptor celular responsable de una función y el efecto del fármaco desaparece, ello demuestra que ejerce su efecto a través de dicho receptor.) Por estas razones, empleamos un gusano no parásito, *Caenorhabditis elegans*, como modelo de un nematodo parásito.

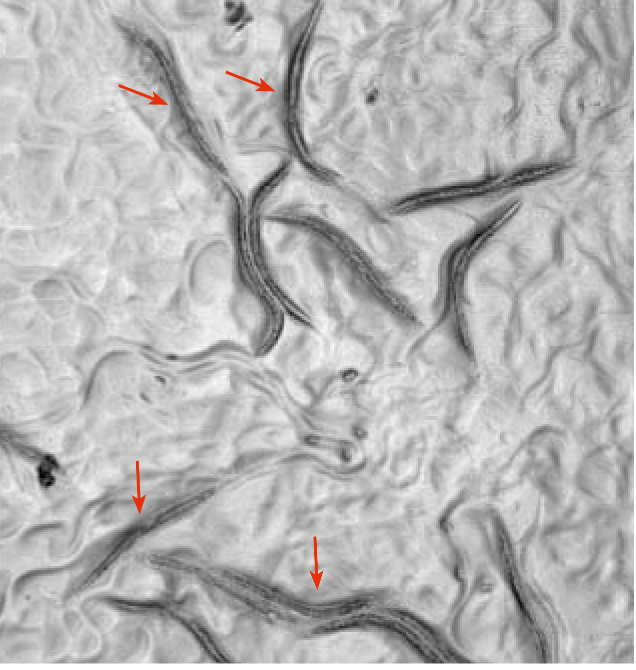
C. elegans es un gusano de vida libre (es decir, no necesita a otro organismo u hospedador para desarrollarse) que habita en el suelo y se alimenta de microorganismos. Pertenece al grupo de los nematodos, dentro del cual figuran varios parásitos muy frecuentes con los que presenta características fisiológicas comunes, como *Enterobious vermicularis* (también conocido como oxiuro), *Ascaris lumbricoides* (mal llamada lombriz intestinal) y *Trichuris trichiura*. A diferencia de estos parásitos, el mantenimiento de *C. elegans* en el laboratorio es muy económico y seguro. Además, al contrario que otros nematodos, esta especie puede manipularse genéticamente de manera bastante sencilla, lo que permite evaluar los mecanismos de acción de nuevas sustancias. Varios artículos describen la importancia del uso de *C. elegans* como modelo para el estudio de antiparasitarios. En 2015, Andrew R. Burns, de la Universidad de Toronto, y sus colaboradores demostraron que la mayoría de las sustancias que son letales para *C. elegans* también lo son para otros gusanos parásitos. De hecho, el modelo ha sido ampliamente utilizado como plataforma para dilucidar los mecanismos de acción y resistencia de fármacos antiparasitarios ya comercializados, y se está empleando para descubrir otros nuevos.

En nuestro laboratorio, al evaluar varios derivados del imidazol, hemos descubierto que el diisopropil-fenil-imidazol (DII) resulta letal para *C. elegans*. El efecto parece ser específico, dado que el compuesto es inocuo para organismos no nematodos, tales como insectos o líneas celulares de mamíferos. La selectividad reviste una enorme importancia en el desarrollo de medicamentos, porque reduce las posibilidades de efectos secundarios.

También hemos demostrado que el mecanismo por el que resulta letal es diferente al descrito para cualquiera de los otros antihelmínticos disponibles. Por ello, podría constituir una opción terapéutica cuando estos fallan. El DII no solo mata a los gusanos adultos, sino que retrasa el desarrollo y también es nocivo para las etapas juveniles (larvas). Mientras que en los adultos el DII inhibe cierto receptor celular del tejido muscular, en las larvas actúa sobre otra diana (que todavía no ha podido identificarse). Al retardar el desarrollo de estas, los gusanos no adquieren capacidad reproductiva y mueren antes de dejar descendencia. Por otro lado, si llegaran a adquirir resistencia en el estado larvario, al alcanzar la fase adulta se verían destruidos por el DII a través de otro mecanismo de acción.

Ese efecto doble representa una mejora respecto a los antiparasitarios clásicos,





M.ª GABRIELA BLANCO

EN LOS CULTIVOS DE GUSANOS *CAENORHABDITIS ELEGANS* se ha comprobado la eficacia de un nuevo fármaco esperanzador. Mientras que en los gusanos sin tratar las curvaturas del cuerpo denotan movilidad y vitalidad (*izquierda*), en los tratados estas no se observan y los gusanos aparecen muertos o inmóviles (*derecha, flechas*).

como el levamisol, el pirantel o el morantel, que son menos efectivos contra las larvas. Hoy en día, suelen administrarse combinaciones de antihelmínticos que actúan sobre diferentes fases con el fin de evitar la aparición de cepas resistentes. El hecho de que el DII intervenga en distintas etapas del crecimiento con distinto mecanismo de acción puede resultar crítico a la hora de retrasar la aparición de resistencia. Estas características podrían proporcionar una ventaja farmacológica importante, superior incluso a la de antihelmínticos relativamente nuevos, como la tribendimidina y el monepantel, que parecen actuar solo en una fase del ciclo biológico.

En resumen, la letalidad de DII sobre nematodos tanto en el período larvario como en el adulto, la selectividad de esta toxicidad y el mecanismo novedoso de acción del DII, sumado al hecho de que la mayoría de las drogas que afectan a la viabilidad de *C. elegans* son efectivas en gusanos parásitos, realzan la potencialidad de este derivado del imidazol como un nuevo antihelmíntico. El próximo paso consistirá en analizar su eficacia en nematodos parásitos mediante el empleo de modelos animales mamíferos como hospedadores.

María José de Rosa, María Gabriela Blanco *y* ***Diego Rayes*** *son investigadores del Instituto de Investigaciones Bioquímicas de Bahía Blanca y del Departamento Biología, Bioquímica y Farmacia de la Universidad Nacional del Sur, en Argentina (CONICET).*

PARA SABER MÁS

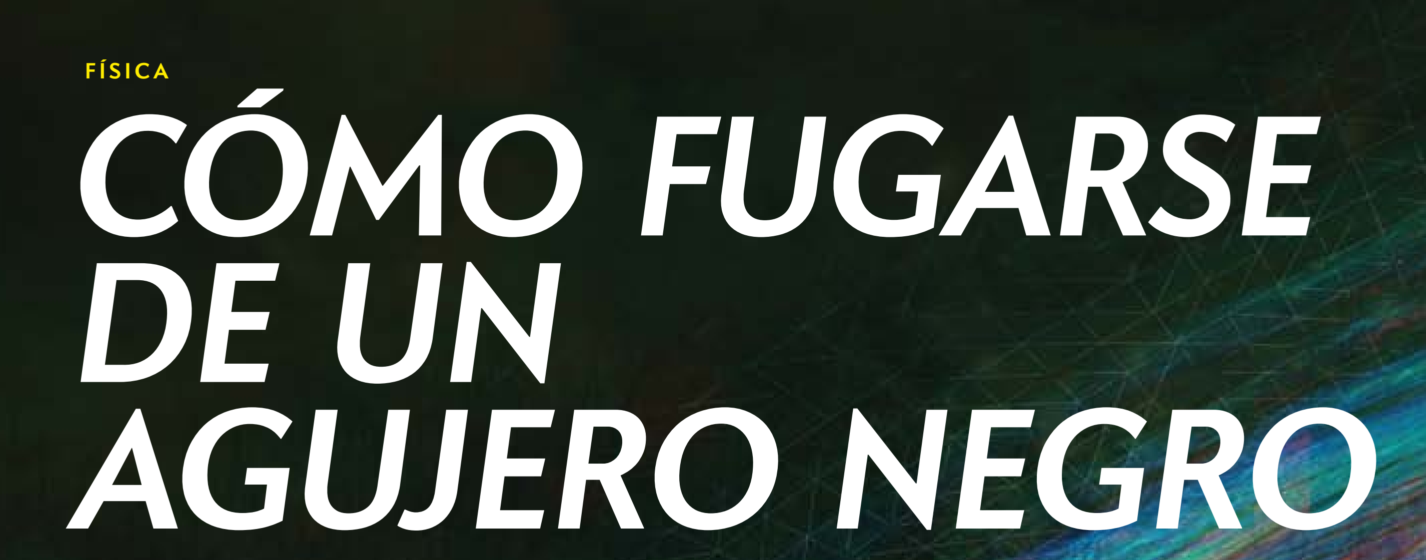
Advances with the Chinese anthelmintic drug tribendimidine in clinical trials and laboratory investigations. Shu-Hua Xiao, et al. en *Acta Tropica*, vol. 126, n.° 2, págs. 115-126, enero de 2013.
Caenorhabditis elegans **is a useful model for anthelmintic discovery.** Andrew R. Burns et al. en *Nature Communications*, vol. 6, artículo n.° 7485, junio de 2015.
Diisopropylphenyl-imidazole (DII): A new compound that exerts anthelmintic activity through novel molecular mechanisms. Gabriela Blanco et al. en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 12, n.° 12, e0007021, diciembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Esquistosomas. Patrick Skelly en *IyC*, agosto de 2008.
Enfermedades tropicales olvidadas. Peter Jay Hotez en *IyC*, marzo de 2010.

FÍSICA

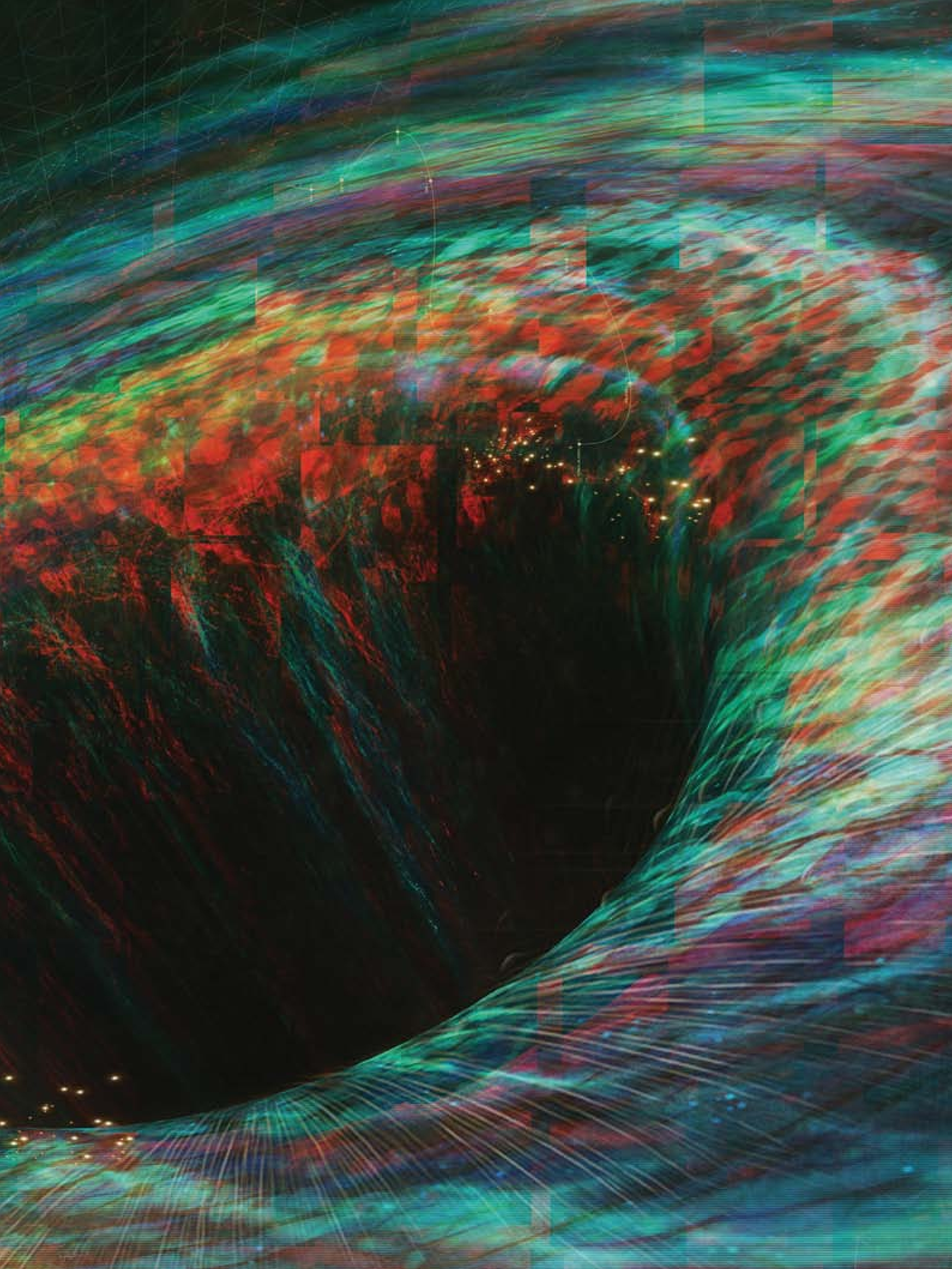
CÓMO FUGARSE DE UN AGUJERO NEGRO



Para salvar la mecánica cuántica, la información debe escapar de los agujeros negros. Nuevas observaciones pueden ayudarnos a entender cómo lo logra

Steven B. Giddings

Ilustración de Mondolithic Studios



Steven B. Giddings es profesor de física cuántica en la Universidad de California en Santa Bárbara. Su trabajo se centra en la física teórica de altas energías, los aspectos cuánticos de la gravedad y los agujeros negros cuánticos.



El 10 de abril de 2019, la humanidad atisbó por primera vez un agujero negro. El Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés), una red de radiotelescopios distribuidos por todo el planeta, difundió la imagen de lo que parece un agujero negro 6500 millones de veces más masivo que el Sol, situado en el centro de la cercana galaxia M87. Supuso un logro impresionante: nuestro primer vistazo a los objetos más misteriosos del universo, predichos desde hace mucho, pero que nunca habían sido avistados directamente. Lo más emocionante es que esta imagen y otras observaciones ya están empezando a proporcionar nuevas pistas sobre uno de los misterios más profundos de la física.

Este enigma es la paradoja de qué ocurre con la información en un agujero negro. Al investigar esta cuestión, los físicos han descubierto que la mera existencia de los agujeros negros resulta incompatible con las leyes cuánticas que, hasta donde sabemos, describen el resto del universo. Resolver esta contradicción podría requerir una revolución conceptual tan profunda como la que nos llevó de la física clásica a la mecánica cuántica.

Los teóricos han examinado muchas ideas, pero no disponían de demasiados indicios directos que les ayudaran a resolver el problema. Sin embargo, con la primera imagen de un agujero negro empezamos a tener datos reales con los que dar forma a nuestras teorías. Las futuras observaciones del EHT (especialmente las que muestren la evolución temporal de los agujeros negros) y las recientes detecciones de fusiones de agujeros negros mediante observatorios de ondas gravitacionales podrían brindarnos pistas importantes y marcar el comienzo de una nueva era en la física.

EL PROBLEMA DE LA INFORMACIÓN

Pese al misterio que los envuelve, los agujeros negros parecen estar por todo el cosmos. Las observaciones del EHT y las mediciones de ondas gravitacionales constituyen los indicios más sólidos y recientes de que estos objetos son reales y sorprendentemente comunes. No obstante, su mera existencia amenaza los fundamentos de la física: al aplicar a los agujeros negros los principios básicos de la mecánica cuántica que creemos que gobiernan el resto de las leyes de la naturaleza, surgen contradicciones. Eso pone de manifiesto algún tipo de fallo en la forma actual de dichas leyes.

El problema emana de una de las preguntas más sencillas que podemos hacernos sobre los agujeros negros: ¿qué ocurre con lo que cae en ellos? De acuerdo con las leyes actuales de la mecánica cuántica, la materia y la energía pueden cambiar de forma. Las partículas, por ejemplo, pueden transformarse en otras. Pero hay algo que es sagrado y nunca se destruye: la información cuántica. Si conocemos la descripción cuántica completa de un sistema, deberíamos ser capaces de determinar siempre y de forma exacta su descripción anterior o posterior, sin pérdida alguna de información. Así que una pregunta más precisa sería: ¿qué ocurre con la información cuántica que cae en un agujero negro?

Nuestra comprensión de los agujeros negros se basa en la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, que describe la gravedad como el resultado de la curvatura del espacio y el tiempo. Una forma habitual de visualizar esta idea es mediante una bola pesada que deforma la superficie de una cama elástica.

EN SÍNTESIS

Según la mecánica cuántica, la información no puede destruirse. Sin embargo, al combinarlas con la relatividad general, las reglas cuánticas parecen implicar que tal destrucción ocurre en los agujeros negros.

Los científicos han propuesto modificaciones a la descripción clásica de los agujeros negros que podrían resolver esta paradoja, pero hasta ahora carecían de pruebas para verificarlas.

Eso está cambiando gracias al Telescopio del Horizonte de Sucesos, que recientemente obtuvo la primera imagen de un agujero negro, y a la detección de las ondas gravitacionales generadas en las colisiones entre agujeros negros.

PROPUESTAS TEÓRICAS

El problema de la información

Los agujeros negros son una predicción de la relatividad general y numerosos indicios astrofísicos apoyan su existencia. Pero en 1974 Stephen Hawking descubrió que los agujeros negros se evaporan. Eso implicaría que todo lo que cae en ellos acaba destruido, incluida la información contenida en la materia que engullen. Sin embargo, la mecánica cuántica prohíbe que se destruya la información. Eso ha llevado a los físicos a lanzar varias propuestas para modificar nuestra imagen de los agujeros negros y hacerla compatible con la física cuántica.

	HIPÓTESIS	DESCRIPCIÓN	PROBLEMA
La información se destruye	**Agujero negro «clásico»** Horizonte de sucesos	Agujero negro con un horizonte de sucesos. La información que entra en el agujero negro se destruye al evaporarse este.	Contradice la mecánica cuántica, que establece que la información no puede destruirse.
La información no se destruye	**Pelo suave** Impronta de la información	La información no entra completamente en el agujero negro, sino que deja una impronta justo fuera del horizonte de sucesos.	La mayoría de los expertos no consideran que esta propuesta proporcione una solución convincente.
	Bola de pelusa	Un tipo de remanente masivo en el que el agujero negro es reemplazado por cuerdas y geometría de dimensiones superiores.	Estos tres escenarios exigen modificar la noción de localidad, es decir, la idea de que nada —tampoco la información— puede viajar más rápido que la luz.
	Muro de fuego Muro de partículas	Un tipo de remanente masivo en el que un muro de partículas de alta energía sustituye al horizonte. El agujero negro no tiene interior.	
	Halo cuántico	Un agujero negro cuántico interacciona con su entorno, posiblemente mediante pequeñas fluctuaciones del espaciotiempo. Eso permite la transferencia de información al exterior.	

AMANDA MONTAÑEZ

La curvatura del espaciotiempo desvía las trayectorias de los objetos con masa y de la luz, y a eso le llamamos gravedad. Si se concentra suficiente masa en una región lo bastante pequeña, la deformación del espaciotiempo a su alrededor será tan intensa que ni siquiera la luz podrá escapar de la región interior al denominado horizonte de sucesos. Tenemos entonces un agujero negro. Y dado que nada —tampoco la información— puede viajar más rápido que la luz, todo aquello que supere esa frontera quedará retenido allí. Así pues, los agujeros negros son sumideros que atrapan tanto la información como la materia y la luz.

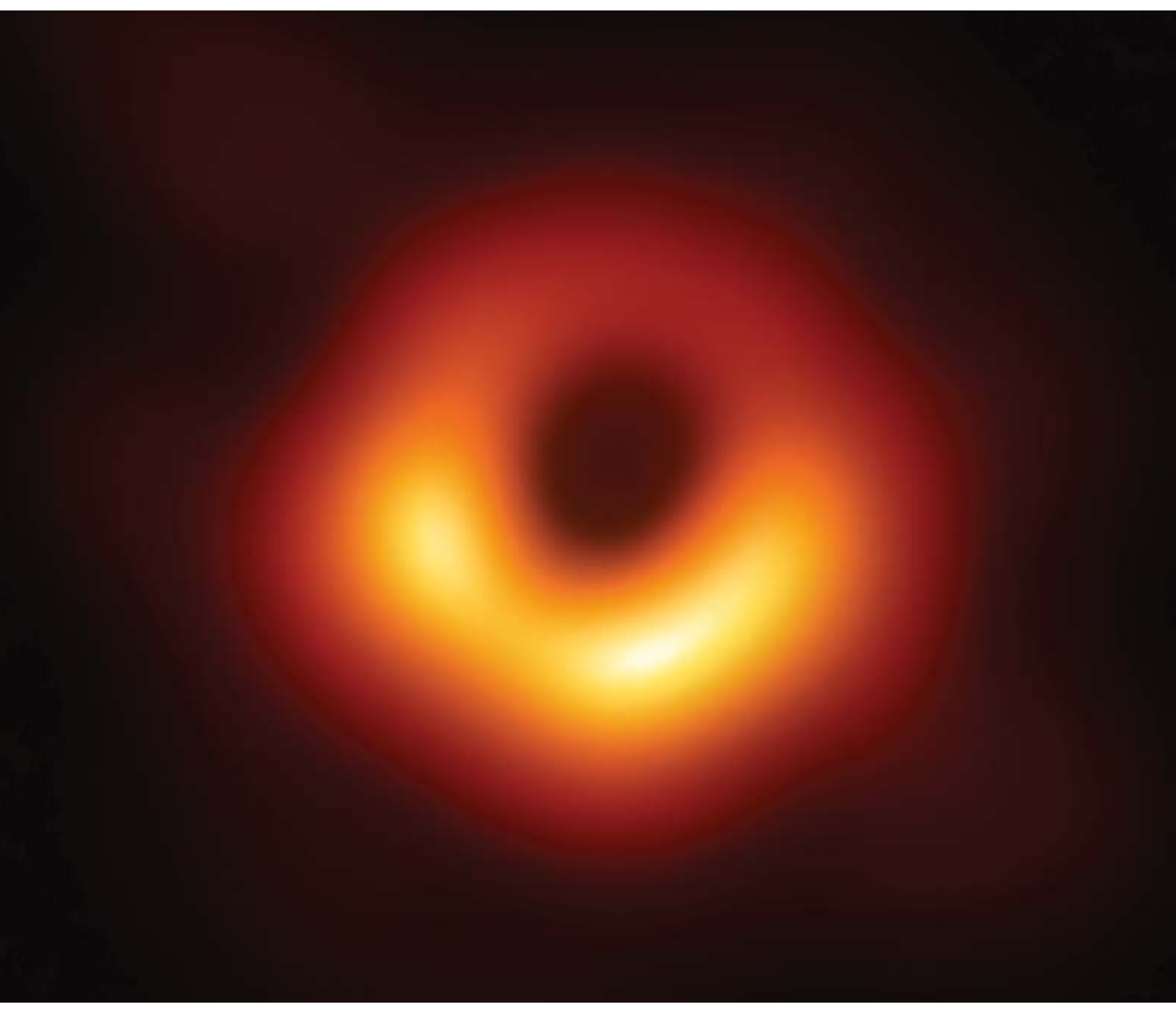
Pero la historia se complica aún más. Uno de los resultados más importantes de Stephen Hawking es su predicción de que los agujeros negros se evaporan. Este hallazgo, realizado en 1974, condujo a la alarmante idea de que los agujeros negros destruyen la información cuántica. Según la mecánica cuántica, en todo lugar y momento se están creando pares de «partículas virtuales», formados por una partícula y su antipartícula. Estos pares normalmente se aniquilan de inmediato, pero si se forman cerca del horizonte de un agujero negro, es posible que una de las partículas caiga dentro de él y la otra logre escapar. Al hacerlo se lleva una energía que, de acuerdo con la ley de conservación de la energía, debe perder el agujero negro.

En consecuencia, la emisión de esas partículas hace que el agujero vaya disminuyendo de tamaño hasta desaparecer por completo. El problema es que las partículas que escapan (y que forman lo que se conoce como radiación de Hawking) no transportan información acerca de lo que cayó al agujero negro. Por lo tanto, los cálculos de Hawking parecen demostrar que la información cuántica que entra en un agujero negro acaba destruida, en contra de lo que postula la mecánica cuántica.

Este descubrimiento abrió una profunda crisis en la física. En el pasado, los trances similares han sido el motor de grandes avances. Por ejemplo, a principios del siglo XX la física clásica parecía predecir la inestabilidad última de los átomos, en abierta contradicción con la existencia de materia estable. Este problema jugó un papel central en la revolución cuántica. Según la física clásica, como los electrones que orbitan en el interior de los átomos están continuamente cambiando de dirección, deberían emitir radiación de forma constante. Eso les haría perder energía, de modo que acabarían precipitándose en espiral sobre el núcleo. Pero en 1913, Niels Bohr propuso que los electrones solo pueden moverse en determinadas órbitas cuantizadas, lo que les impide caer hacia el interior. Esta idea radical ayudó a sentar las bases de la mecánica cuántica, que reescribió las leyes de la naturaleza a nivel fundamental. Cada vez parece más claro que la crisis de los agujeros negros conducirá, de manera similar, a un cambio de paradigma en la física.

ALTERNATIVAS CUÁNTICAS

Cuando predijo la evaporación de los agujeros negros, Hawking sugirió que la mecánica cuántica tenía que estar equivocada y que en realidad debía ser posible destruir la información. Pero los físicos pronto se die-



EN ESTA TRASCENDENTAL IMAGEN obtenida por el Telescopio del Horizonte de Sucesos, la gravedad curva la luz alrededor de lo que parece ser un agujero negro en el centro de la galaxia M87.

COLABORACIÓN DEL EHT Y OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL

ron cuenta de que eso conllevaría una drástica violación de la ley de conservación de la energía, que invalidaría nuestra descripción actual del universo. Así pues, parece necesario buscar una solución diferente.

Otra idea que se planteó en un primer momento fue la de que los agujeros negros quizá no se evaporan por completo, sino que dejan tras de sí un remanente microscópico que contendría la información original. Pero si esto fuera así, las propiedades básicas de la mecánica cuántica predecirían inestabilidades catastróficas que llevarían a la materia ordinaria a convertirse en esos remanentes, lo cual tampoco concuerda con nuestra experiencia cotidiana.

Es evidente que hay algo profundamente incorrecto. Resulta tentador concluir que el error está en el análisis original de Hawking y que la información escapa de algún modo de un agujero negro que emite radiación de Hawking. El problema es que esta idea entra en conflicto con un concepto fundamental de la física actual: el principio de localidad, que establece que la información no puede desplazarse a velocidades superlumínicas, es decir, mayores que la de la luz. Pero según nuestra definición, la única manera de escapar de un agujero negro es viajar más rápido que la luz. Por lo tanto, si la información consigue escapar, debe hacerlo a velocidades superlumínicas, violando el principio de localidad. En las cuatro décadas transcurridas

desde el descubrimiento de Hawking, los físicos han intentado encontrar fisuras en este argumento, pero no las han encontrado.

Quienes más se acercaron fueron el propio Hawking, Malcolm Perry y Andrew Strominger. En 2016, estos investigadores propusieron que, debido a un error en el análisis original, la información en realidad nunca llega a entrar completamente en el agujero negro. En cambio, dejaría una especie de impronta en el exterior, en forma de lo que se conoce como «pelo suave». No obstante, un análisis más detallado parece estar cerrando este resquicio y la mayoría de los expertos no creen que constituya la respuesta al problema. En suma, todo indica que es necesario considerar alternativas más radicales.

Una posibilidad obvia es que algún tipo de física aún desconocida impida que existan los agujeros negros. La visión habitual es que, cuando una estrella muy masiva agota su combustible nuclear y muere, se derrumba bajo la acción de su propia gravedad para formar un agujero negro. Pero ¿y si la estrella nunca alcanzara ese estadio y en realidad se transformara en un objeto que se comportase «mejor»? De hecho, cuando las estrellas de menor masa, como nuestro Sol, colapsan al final de su vida no producen agujeros negros, sino restos densos como las enanas blancas o las estrellas de neutrones. Quizás alguna ley física desconocida evite que las estrellas de mayor masa den lugar a agujeros negros y las lleve a convertirse en algún tipo de remanente masivo, algo más parecido a una estrella de neutrones que a un agujero negro.

El problema con esta idea es explicar cómo se estabilizarían tales objetos: ningún proceso físico conocido puede evitar que colapsen debido a su propia gravedad, y cualquier proceso imaginable requeriría un intercambio superlumínico de información entre los extremos del objeto que se derrumba. En realidad, los grandes agujeros negros pueden formarse a partir de materia con una densidad muy baja. Por ejemplo, si el agujero negro de 6500 millones de masas solares que hay en el centro de M87 hubiera surgido a partir de una nube de polvo —lo que en teoría es posible, aunque parece que en realidad su formación fue más compleja—, el colapso se habría iniciado cuando el polvo hubiera alcanzado la densidad del aire en la cima del Everest (el aire en la cima del Everest no forma un agujero negro porque no hay suficiente: harían falta 6500 millones de masas solares). Para que la nube se convirtiera de manera instantánea en un remanente masivo en vez de dar lugar a un agujero negro, algún nuevo proceso físico drástico y superlumínico debería dominar en ese régimen de baja densidad.

Otra posibilidad relacionada es que el agujero negro sí se forme pero, mucho antes de evaporarse, se convierta en un remanente masivo que incluya toda la información original. Una vez más, esto requeriría la transferencia no local de información desde el interior del agujero negro inicial hasta el remanente final.

A pesar de estos problemas, los físicos han contemplado versiones de los dos escenarios anteriores. Por ejemplo, en 2003 Samir Mathur planteó una propuesta basada en la teoría de cuerdas (que afirma que las partículas fundamentales son cuerdas diminutas). Su idea es que el agujero negro se transforma en un tipo de remanente masivo conocido como «bola de pelusa» (*fuzzball*), o bien que esta se forma directamente en vez del agujero negro. Gracias a la complicada física de la teoría de cuerdas, que requiere un espaciotiempo con más de cuatro dimensiones, las bolas de pelusa pueden tener una geometría complicada: en lugar de la abrupta frontera de un agujero negro tradicional (el horizonte de sucesos), la bola de pelusa tendría una frontera más grande y difusa, en la que nos encontraríamos cuerdas y geometría de dimensiones superiores.

Una versión más reciente de la idea del remanente propone que, en lugar de un agujero negro convencional, lo que se forma es un remanente masivo rodeado de un «muro de fuego» de partículas de alta energía, situado allí donde debería estar el horizonte de sucesos. Este muro incineraría cualquier cosa que se topase con él, convirtiéndola en energía pura que se añadiría al muro. No obstante, tanto el escenario del muro de fuego como el de la bola de pelusa precisan violaciones de la localidad, y los objetos resultantes tendrían otras propiedades muy difíciles de explicar.

MODIFICAR LA LOCALIDAD

Todas las propuestas para salvar la mecánica cuántica basadas en remanentes masivos parecen requerir violaciones del principio de localidad. Pero implementarlas de manera imprudente sería tan desastroso como modificar la teoría cuántica y, de hecho, conduciría a otra paradoja. De acuerdo con las leyes de la relatividad, si enviásemos una señal superlumínica en el espacio plano vacío, otros observadores que nos adelantasen a suficiente velocidad la verían viajar hacia atrás en el tiempo. La paradoja estriba en que eso nos permitiría mandar un mensaje al pasado, por ejemplo, para pedirle a alguien que matara a nuestra abuela antes de que naciese nuestra madre.

A pesar de que este tipo de soluciones parecen contradecir principios físicos fundamentales, merece la pena examinarlas con más detalle. Modificar la localidad parece una locura, pero aún no hemos encontrado ninguna alternativa que no lo parezca. La gravedad de la crisis de los agujeros negros sugiere que su resolución pasa por una violación sutil del principio de localidad que no produzca tales paradojas. Dicho de otra forma, la mecánica cuántica implica que la información nunca se destruye, así que la información que cae a un agujero negro debe escapar de algún modo, posiblemente mediante alguna nueva y sutil «deslocalización» de la misma. El mecanismo podría quedar patente cuando hallemos la manera de unificar la mecánica cuántica y la gravedad, uno de los problemas más profundos de la física actual. De hecho, tenemos otras razones para pensar que podría existir dicha sutileza. La propia noción de información localizada (el hecho de que pueda existir en un lugar y no existir en otro) es más peliaguda en las teorías que incluyen la

Los agujeros negros contienen pistas cruciales sobre la teoría cuántica de la gravedad y la propia naturaleza del espaciotiempo. Es probable que comprenderlos mejor nos conduzca a la próxima revolución conceptual de la física

gravedad, ya que los campos gravitatorios se extienden hasta el infinito y complican el concepto de localización.

Pero podría no ser necesario un cambio tan obvio y abrupto como la formación de un remanente masivo (ya sea en forma de bola de pelusa, muro de fuego o cualquier otra variante) para que la información escape de los agujeros negros. Cada vez hay más indicios observacionales de que en el universo existen objetos cuyo aspecto y comportamiento se ajusta al de los agujeros negros clásicos, sin mostrar grandes discrepancias con las predicciones de Einstein. ¿Está la relatividad general tan equivocada en su descripción de los agujeros negros? ¿O acaso hay algún efecto más inocuo, aún desconocido, que sirva para deslocalizar la información y permitir que salga de los agujeros negros, evitando así que se venga abajo toda nuestra visión del espaciotiempo?

En mi reciente trabajo teórico he encontrado dos versiones de tales efectos. En una de ellas, la geometría del espaciotiempo cerca del agujero negro se curva y se ondula de una forma que depende de la información contenida en el agujero. Esta modificación de la geometría es suave, de modo que, por ejemplo, no destruiría a un astronauta que atravesara la región donde habitualmente se encuentra el horizonte de sucesos. En este escenario «no violento fuerte», esas alteraciones del espaciotiempo podrían transportar la información al exterior. Pero también he hallado una manera más sutil e intrínsecamente cuántica de que la información escape del agujero negro. En ese segundo escenario «no violento débil», las diminutas fluctuaciones cuánticas de la geometría del espaciotiempo cerca del agujero negro pueden transferir información a las partículas que emergen de él. Dicha transferencia de información puede ser lo bastante grande como para rescatar la mecánica cuántica, lo cual está relacionado con la enorme cantidad de información que es capaz de albergar un agujero negro. En ambas versiones de esta propuesta, el agujero negro posee una especie de «halo cuántico» alrededor suyo, donde las interacciones devuelven la información al exterior.

Las propias nociones de espacio y tiempo sobre las que reposa el resto de la ciencia parecen necesitar una importante revisión

Aunque ambos escenarios parecen requerir que la información viaje de forma superlumínica, no producen necesariamente la «paradoja de la abuela». La transmisión de información en estos casos está ligada a la existencia del agujero negro, que tiene una geometría espaciotemporal diferente a la del espacio plano vacío, por lo que los argumentos anteriores acerca de comunicarnos con el pasado no son válidos. Estas propuestas también son interesantes desde otra perspectiva: el principio de localidad es lo que prohíbe que podamos viajar a mayor velocidad que la luz, y la mecánica cuántica de los agujeros negros sugiere que hay algo incorrecto en la formulación actual de este principio.

REESCRIBIR LAS LEYES DE LA FÍSICA

La posibilidad de un halo cuántico no ha sido aún predicha por una teoría física más completa que reconcilie la mecánica cuántica y la gravedad, pero la necesidad de resolver el problema y las suposiciones basadas en lo que vemos apuntan claramente en esa dirección. Si esta idea es correcta, probablemente constituya una descripción aproximada de una realidad más profunda. Las propias nociones de espacio y tiempo sobre las que reposa el resto de la ciencia parecen necesitar una importante revisión. El presente esfuerzo por entender los agujeros negros podría ser similar a los primeros intentos de modelizar el átomo que llevaron a cabo Bohr y otros físicos. Esas primeras descripciones atómicas también eran aproximaciones, que solo con el tiempo condujeron a la profunda estructura teórica de la mecánica cuántica. Aunque modificar la localidad parezca una locura, las leyes de la mecánica cuántica también les parecían disparatadas a los físicos clásicos que participaron en su descubrimiento.

Dado el inmenso desafío que supone explicar los agujeros negros cuánticos y hallar una teoría más completa que los describa, los físicos ansiamos disponer de indicios experimentales y observacionales que nos guíen. Los avances recientes han abierto a la humanidad dos ventanas que permiten observar de manera directa el comportamiento de los agujeros negros. Además de las imágenes del EHT, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) y otros instrumentos similares han comenzado a detectar ondas gravitacionales producidas en colisiones entre lo que parecen agujeros negros. Estas ondas contienen valiosa información sobre las propiedades de los objetos que las generan.

En principio, podría parecer absurdo pensar que el EHT o LIGO van a ser capaces de detectar desviaciones respecto a la descripción de Einstein de los agujeros negros. Siempre se había pensado que solo habría que modificar la relatividad general cuando la curvatura del espaciotiempo fuera extremadamente grande, cerca del centro del agujero. Por contra, en el horizonte de sucesos de un agujero negro de gran tamaño la curvatura es muy pequeña. Pero la crisis de la información ha convencido a gran parte de la comunidad teórica de que es necesario introducir cambios en las leyes de la física no solo en lo más profundo del agujero negro, sino desde antes de atravesar el horizonte. Parece que hemos cruzado el Rubicón. En el caso del agujero negro de M87, la distancia a la cual esperaríamos encontrar discrepancias con las predicciones clásicas es varias veces mayor que el radio de nuestro sistema solar.

LIGO y el EHT ya han descartado otras posibilidades más radicales a las que podríamos recurrir para intentar dar una descripción coherente de los agujeros negros. En particular, si en lugar de agujeros negros hubiera remanentes masivos con más del doble de su diámetro, ya habríamos visto indicios de ello en ambos experimentos. En el caso del EHT, mucha de la luz que se ve en la ya célebre imagen proviene de una región con un diámetro aproximadamente una vez y media mayor que el del horizonte de sucesos. Y parte de las ondas gravitacionales que detecta LIGO se producen cuando los objetos que colisionan alcanzan separaciones de ese orden. Aunque el estudio de estas señales aún está en una fase temprana, lo que han revelado el EHT y LIGO son objetos muy oscuros y compactos que producen señales como las predichas para los agujeros negros tradicionales.

Aun así, hay que seguir estudiando estas señales. Un análisis suficientemente detallado podría aportar más pistas sobre la física cuántica de los agujeros negros. Incluso si no se observa-

ran efectos nuevos, obtendríamos información para acotar las posibles descripciones de su comportamiento cuántico.

Los remanentes muy grandes ya están descartados. Pero ¿qué pasa con los modelos de remanentes donde la descripción del agujero negro solo cambia muy cerca del horizonte? Aunque una discusión completa requeriría una teoría más detallada de esos objetos (como las bolas de pelusa o los muros de fuego), disponemos de algunos indicios. En concreto, si estos remanentes tuvieran radios ligeramente mayores que el del horizonte del correspondiente agujero negro, es probable que no pudiéramos detectarlos ni con las observaciones del EHT ni con las de LIGO, ya que hay muy poca luz o radiación gravitacional que escape desde regiones tan cercanas al horizonte.

Una posible excepción serían los «ecos» gravitacionales. En 2016, Vitor Cardoso (de la Universidad de Lisboa), Edgardo Franzin (por entonces en la Universidad de Cagliari) y Paolo Pani (de la Universidad La Sapienza, en Roma) propusieron que si dos de estos remanentes se combinaran para formar otro con propiedades similares, las ondas gravitacionales podrían reflejarse en la superficie del objeto resultante y ser detectadas. Aunque la mayoría de los modelos que proponen modificaciones cerca del horizonte son difíciles de descartar mediante observaciones, no es sencillo explicar cómo pueden ser estables tales estructuras, en vez de colapsar bajo su propia gravedad para formar un agujero negro. Este es un problema común a todos los escenarios de remanentes masivos, pero que cobra especial relevancia en presencia de las intensas fuerzas implicadas en estas colisiones.

Las perspectivas observacionales son mejores para los modelos en los que nuevas interacciones se reflejan en modificaciones sutiles de la geometría del espaciotiempo, pero que se extienden a distancias considerables del horizonte. Por ejemplo, en el escenario no violento fuerte, las ondulaciones del halo cuántico del agujero negro pueden perturbar la luz que pasa cerca de este. Si esta propuesta es correcta, la titilación produciría distorsiones en las imágenes del EHT que cambiarían con el tiempo.

El científico del EHT Dimitrios Psaltis y yo hemos calculado que, para el agujero negro del centro de nuestra galaxia, esos cambios podrían ocurrir en el transcurso de una hora, más o menos. Dado que el EHT promedia las observaciones realizadas durante períodos de varias horas, sería difícil detectar tales efectos. Pero en el caso del agujero negro de M87, que es más de mil veces más grande, la escala de tiempo de las fluctuaciones sería del orden de decenas de días. Eso indica que para buscar las distorsiones deberíamos usar observaciones más largas que los siete días que se invirtieron en producir la primera imagen del EHT. Si el experimento encontrara esas alteraciones, supondrían una pista espectacular sobre la física cuántica de los agujeros negros. En caso de no detectarlas, eso apuntaría al escenario no violento débil, o a algo incluso más exótico.

El escenario no violento débil es más difícil de poner a prueba, porque se esperan cambios relativamente pequeños en la geometría. Aun así, los estudios preliminares muestran que podrían alterar la forma en que se absorben o reflejan las ondas gravitacionales, lo que tal vez repercuta de manera perceptible en las señales detectadas.

Si cualquiera de estas dos propuestas fuese correcta, no solo aprenderíamos acerca de los agujeros negros cuánticos, sino también sobre las propias leyes de la naturaleza. Actualmente no tenemos del todo claro cómo debemos pensar en la localización de la información en presencia de campos gravitatorios. La física cuántica indica que el propio espaciotiempo no es algo fundamental, sino que emerge como una aproximación de una estructura matemática más básica. Detectar los efectos de los agujeros negros cuánticos podría ayudarnos a concretar esta idea.

Para seguir aprendiendo, es importante ampliar y mejorar tanto las medidas del EHT como las de las ondas gravitacionales. En el caso del EHT, sería útil disponer de observaciones bastante más largas y de imágenes de otros objetos, como el agujero negro del centro de nuestra galaxia. Ambos objetivos están previstos. En cuanto a las ondas gravitacionales, convendría tener más observaciones de mayor sensibilidad, a lo que ayudará la puesta en marcha de nuevos detectores en Japón y la India, que se unirán a los ya existentes en Estados Unidos y Europa [*véase* «El observatorio KAGRA», por Lee Billings; Investigación y Ciencia, enero de 2020]. Pero también será necesario un gran esfuerzo teórico para refinar las propuestas, aclarar su origen y motivación, y evaluar más a fondo en qué medida pueden afectar a las señales del EHT o de las ondas gravitacionales.

Independientemente de cuál sea la resolución de la crisis, los agujeros negros contienen pistas cruciales sobre la teoría cuántica de la gravedad y la propia naturaleza del espaciotiempo. Al igual que pasó con los átomos y la mecánica cuántica, es probable que comprender mejor los agujeros negros nos conduzca a la próxima revolución conceptual de la física. El EHT y las observaciones de ondas gravitacionales podrían proporcionar información clave, ya sea descartando propuestas de agujeros negros cuánticos o descubriendo fenómenos asociados con ellas. IyC

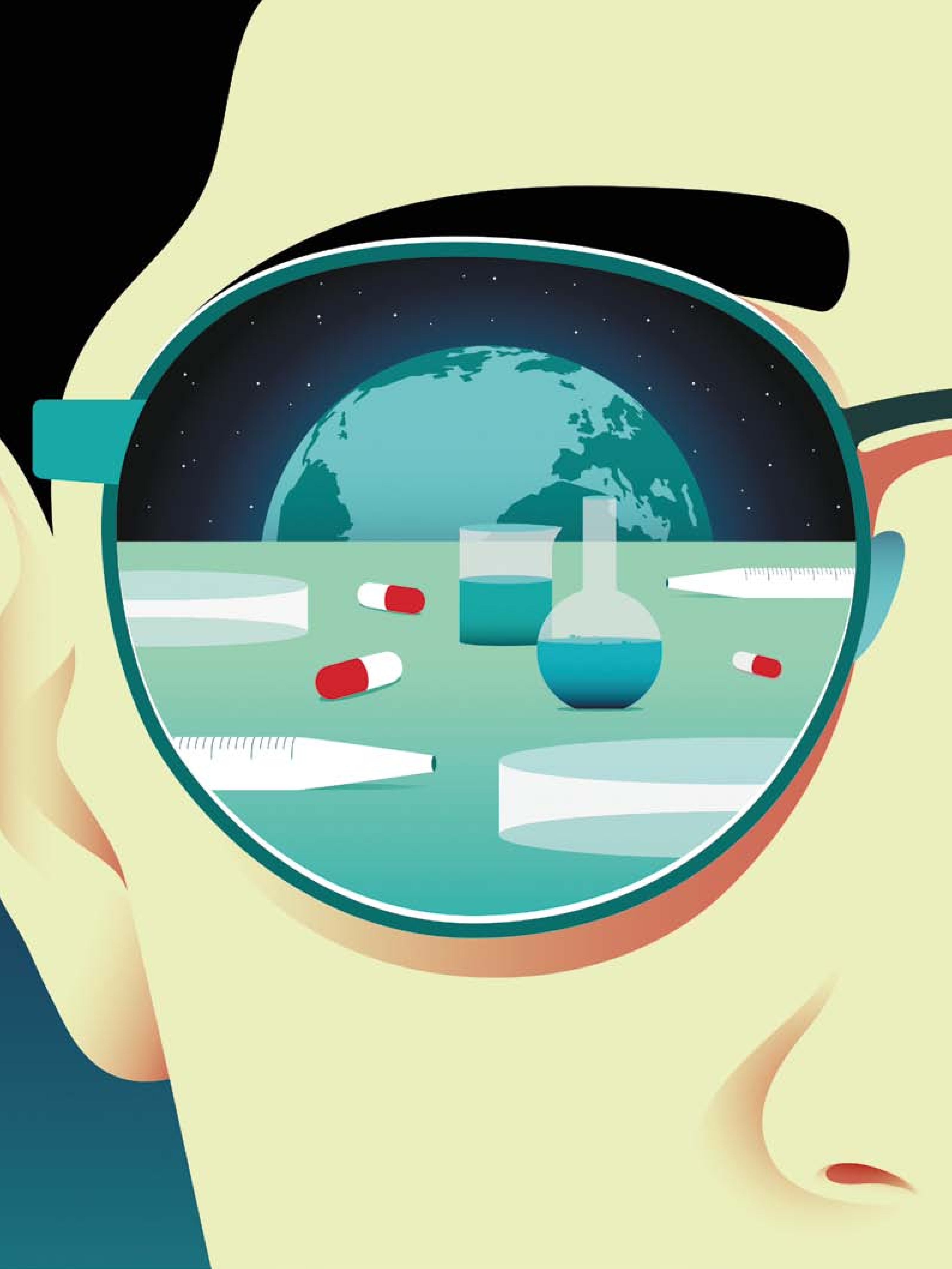


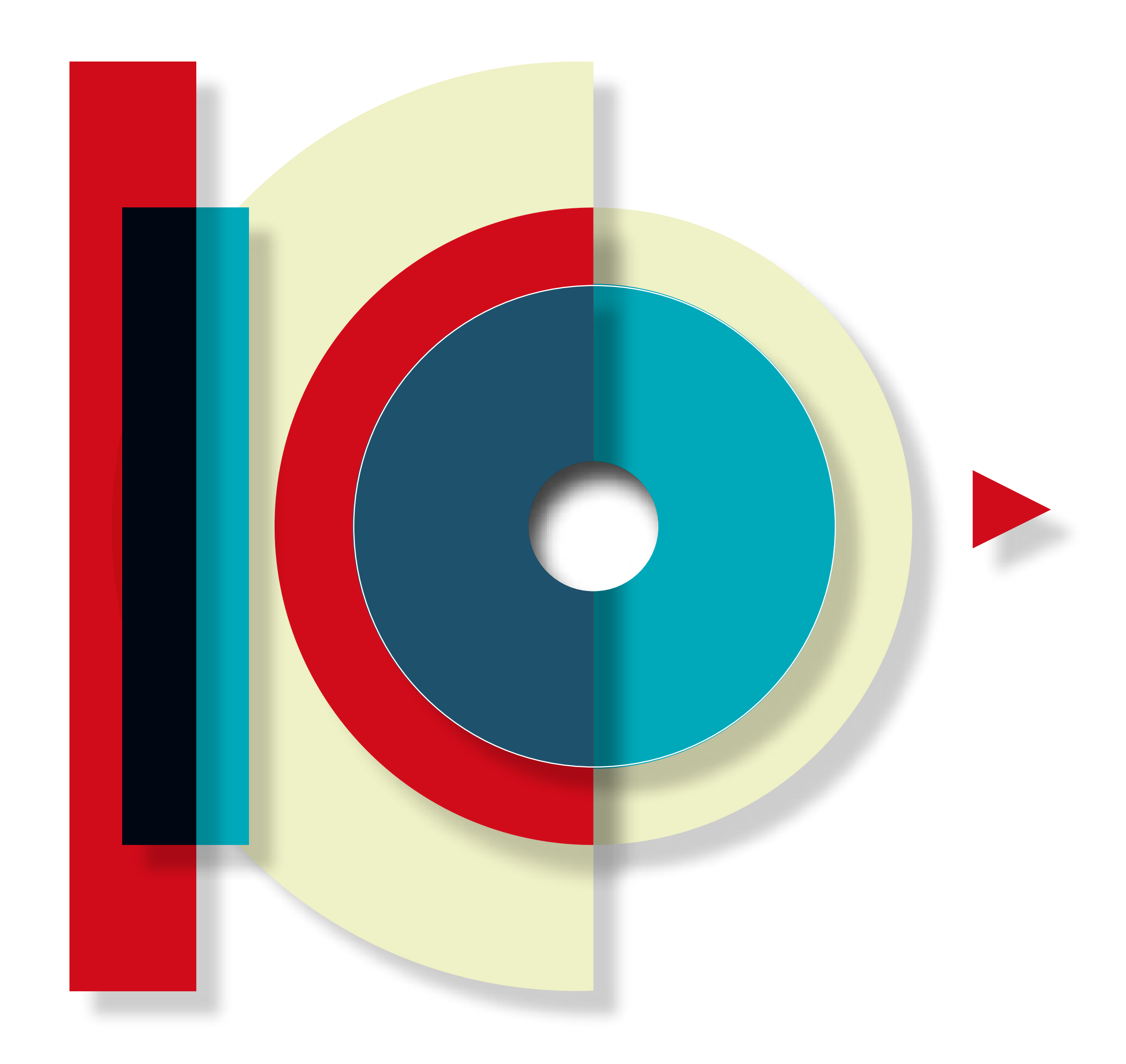
PARA SABER MÁS

Particle creation by black holes. Stephen W. Hawking en *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43, págs. 199-220, agosto de 1975.
Jerusalem lectures on black holes and quantum information. Daniel Harlow en *Reviews of Modern Physics*, vol. 88, art. 015002, febrero de 2016.
Is the gravitational-wave ringdown a probe of the event horizon? Vitor Cardoso, Edgardo Franzin y Paolo Pani en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. 171101, abril de 2016.
Black holes in the quantum universe. Steven B. Giddings en *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 377, art. 20190029, noviembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC*, junio de 1997.
Agujeros negros y muros de fuego. Joseph Polchinski en *IyC*, abril de 2015.
La prueba del agujero negro. Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman en *IyC*, noviembre de 2015.
La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.
Ecos desde el horizonte. Pablo Bueno y Pablo A. Cano en *IyC*, junio de 2019.





INFORME ESPECIAL

LAS 10 TÉCNICAS EMERGENTES MÁS PROMETEDORAS DEL MOMENTO

AVANCES REVOLUCIONARIOS QUE ESTÁN A PUNTO DE SACUDIR EL *STATU QUO* A ESCALA MUNDIAL

Ilustraciones de Vanessa Branchi

EN SÍNTESIS

Uno de los grandes problemas ambientales, los residuos plásticos, se aliviará con los nuevos materiales biodegradables a base de celulosa y lignina. Los abonos mejorados de liberación controlada reducirán la contaminación agrícola. El almacenamiento de energía renovable a gran escala y el posible resurgimiento de las centrales nucleares con combustibles y reactores más seguros y eficientes nos permitirán avanzar en la descarbonización del sector energético.

Los robots sociales, cada vez más avanzados, irán ganando presencia en nuestra vida. Las metalentes podrían servir para reducir el tamaño y el coste de los componentes ópticos. Y la telepresencia colaborativa permitirá que interaccionemos virtualmente como si estuviéramos en el mismo espacio físico.

En el ámbito de la salud, destacan los fármacos contra proteínas dúctiles, asociadas a varias enfermedades graves. Las cadenas de bloques y los sensores de la calidad de los alimentos contribuirán a reducir las intoxicaciones. Y el almacenamiento de enormes cantidades de datos en forma de ADN está ayudando a desarrollar fármacos y terapias.

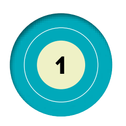
Algún día, una de las técnicas emergentes recogidas en este informe

nos permitirá teletransportarnos virtualmente a un lugar lejano y sentir los apretones de manos y los abrazos de otros viajeros cibernéticos. Otros adelantos están a punto de volverse corrientes: robots humanoides (y animaloides) diseñados para socializar con la gente; un sistema para localizar el origen de un brote de fiebre aftosa en cuestión de segundos; lentes minúsculas que allanarán el camino hacia las cámaras en miniatura; plásticos fuertes y biodegradables que pueden fabricarse a partir de residuos vegetales que de otro modo serían inútiles; y sistemas de almacenamiento de datos basados en el ADN que guardarán con fiabilidad ingentes cantidades de información.

En colaboración con el Foro Económico Mundial, *Scientific American* convocó a un comité internacional de expertos, formado por distinguidos especialistas en tecnología, y se embarcó en el duro proceso de identificar las diez técnicas emergentes más prometedoras del momento. Tras solicitar la participación de otros expertos de todo el mundo, el comité evaluó docenas de propuestas según una serie de criterios: ¿tienen las técnicas sugeridas el potencial de ofrecer beneficios importantes a la sociedad y a la economía? ¿Podrían alterar la manera establecida de hacer las cosas? ¿Se hallan aún en las primeras etapas de desarrollo, pero despiertan el interés de los centros de investigación, las empresas o los inversores? ¿Es probable que logren avances notables en los próximos años? El comité buscó la información necesaria y pulió la lista a lo largo de cuatro reuniones virtuales.

Confiamos en que disfruten con la lectura de este informe. Esperamos sus opiniones y comentarios.

—Mariette DiChristina y Bernard S. Meyerson



MEDIOAMBIENTE

BIOPLÁSTICOS PARA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

ENZIMAS Y DISOLVENTES AVANZADOS TRANSFORMAN LOS RESIDUOS VEGETALES EN PLÁSTICOS MÁS BIODEGRADABLES

Por Javier García Martínez

Nuestra civilización se edifica sobre el plástico. Solo en 2014, las industrias generaron 311 millones de toneladas métricas, una cantidad que se calcula que se triplicará en el 2050, según el Foro Económico Mundial. Sin embargo, se recicla menos del 15 por ciento. El resto, en su mayor parte, se incinera, se deposita en vertederos o va a parar al ambiente, donde, por su resistencia a la degradación microbiana, puede perdurar cientos de años. El plástico que se acumula en el océano causa toda suerte de desastres, desde la muerte de los animales que lo ingieren por error hasta la liberación de sustancias tóxicas. Incluso puede entrar en nuestro organismo a través del consumo de pescado contaminado.

Los plásticos biodegradables pueden aliviar estos problemas y contribuir al objetivo de lograr una economía «circular» en la cual los plásticos se obtengan a partir de biomasa y se conviertan de nuevo en esta. Al igual que los plásticos derivados del petróleo, los biodegradables consisten en polímeros (moléculas de cadena larga) que pueden moldearse en multitud de formas mientras se hallan en estado fluido. Sin embargo, las opciones hoy disponibles (fabricadas en su mayoría a partir de maíz, caña de azúcar o grasas y aceites residuales) carecen en general de la resistencia mecánica y las características estéticas de los materiales clásicos. Los recientes adelantos en la producción de plásticos a partir de celulosa o lignina (la materia seca de las plantas) resultan prometedores para superar esos inconvenientes. Presentan, además, una ventaja adicional para el ambiente: la celulosa y la lignina pueden obtenerse de plantas no alimenticias, como la caña común o carrizo, cultivadas en tierras marginales no aptas para productos alimentarios, o de desechos forestales y subproductos agrícolas que de otro modo no tendrían ninguna utilidad.

La celulosa, el polímero orgánico más abundante de la Tierra, es un componente importante de las paredes celulares vegetales; la lignina rellena los espacios en ellas, pro-



porcionando fuerza y rigidez. Para obtener plásticos a partir de estas sustancias, primero han de descomponerse en sus unidades básicas, o monómeros. Los investigadores han descubierto recientemente métodos para llevarlo a cabo. El trabajo sobre la lignina reviste especial importancia, pues sus monómeros contienen anillos aromáticos, las estructuras químicas que proporcionan a algunos plásticos tradicionales su resistencia mecánica y otras características deseables. La lignina es insoluble en la mayoría de los disolventes, pero se ha observado que ciertos líquidos iónicos (constituidos sobre todo por iones) que son respetuosos con el ambiente pueden separarla de manera selectiva de la madera y las plantas leñosas. A continuación, unas enzimas diseñadas genéticamente, similares a las de ciertos hongos y bacterias, pueden romper la lignina disuelta en sus elementos básicos.

Estos resultados han fomentado la creación de empresas. Chrysalix Technologies, derivada del Colegio Imperial de Londres, ha desarrollado un proceso que utiliza líquidos iónicos de bajo coste para aislar la celulosa y la lignina de las materias primas. Una empresa finlandesa de biotecnología, MetGen Oy, produce una serie de enzimas genéticamente modificadas que dividen ligninas de diferentes orígenes en compuestos necesarios para una amplia gama de aplicaciones. Y Mobius (antes llamada Grow Bioplastics) está desarrollando *pellets* de plástico a partir de lignina para su empleo en macetas biodegradables, mantillo agrícola y otros productos.

Aún han de salvarse muchos obstáculos antes de que se extienda el uso de estos nuevos plásticos. Uno de ellos es el coste. Además, se debería minimizar la superficie de terreno y la cantidad de agua empleadas para producirlos; aun cuando la lignina provenga solo de residuos, se necesita agua para convertirla en plástico. Como en cualquier desafío importante, las soluciones requerirán una combinación de medidas, desde regulaciones hasta cambios voluntarios en la forma en que la sociedad usa y desecha los plásticos. Aun así, las técnicas emergentes de producción de plástico biodegradable proporcionan un ejemplo perfecto de cómo disolventes más ecológicos y biocatalizadores más eficaces pueden contribuir a generar una economía circular en una industria importante.

COMITÉ DE EXPERTOS

Mariette DiChristina, presidenta del comité, es decana de la Facultad de Comunicación de la Universidad de Boston y editora emérita de *Scientific American*.

Bernard S. Meyerson, vicepresidente del comité, es director de innovación emérito de IBM. Miembro de la Academia Nacional de Ingeniería de EE.UU., ha recibido numerosos galardones por sus trabajos en física, ingeniería y economía. Entre 2014 y 2016 fue presidente del Metaconsejo de Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial, y entre 2016 y 2018 presidió el Consejo del Futuro Global sobre Materiales Avanzados. Sigue comprometido con varios estudios del FEM, como «El futuro de la producción en EE.UU.» e «Innovaciones con un propósito: fortalecer los sistemas alimentarios a través de la tecnología».

Jeff Carbeck es fundador de varias empresas y director ejecutivo de 10EQs, una iniciativa que reúne a expertos de la industria especializada y consultores independientes de primer nivel para ayudar a las organizaciones a crecer y aumentar su rendimiento. Ha sido miembro del Consejo del Futuro Global sobre Materiales Avanzados (2016-2018), y una de las empresas que cofundó, MC10, ha sido reconocida como pionera en tecnología por el Foro Económico Mundial.

Rona Chandrawati es profesora de la Universidad de Nueva Gales del Sur, titular y directora del Laboratorio de Nanotecnología para Alimentación y Medicina. Su investigación se centra en el desarrollo de nanosensores colorimétricos para el diagnóstico de enfermedades, la seguridad alimentaria y la vigilancia ambiental. Fue elegida Joven Científica del Foro Económico Mundial en 2018. En esta entidad, forma parte de la Red de Expertos y ha sido miembro del Consejo de Biotecnología.

Seth Fletcher es editor de *Scientific American* especializado en física y tecnología.

Javier García Martínez es profesor de química inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante. Cofundador de Rive Technology y miembro del Comité Ejecutivo de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, pertenece a la Red de Expertos del Foro Económico Mundial. Entre sus libros figuran *Nanotechnology for the energy challenge* y *The chemical element: Chemistry's contribution to our global future*.

Hiroaki Kitano, experto en inteligencia artificial y biología de sistemas, es presidente y director ejecutivo del Laboratorio de Ciencias de la Computación de Sony y director del Instituto de Biología de Sistemas, ambos en Tokio. Entre 2016 y 2019 ha sido miembro de varios Consejos para el Futuro Global del Foro Económico Mundial, incluido el de Inteligencia Artificial y Robótica.

Corinna E. Lathan es cofundadora y directora ejecutiva de AnthroTronix, una empresa de investigación y desarrollo en ingeniería biomédica que crea productos de salud digital, tecnología ponible, robótica y realidad aumentada. Forma parte de la junta de PTC, un proveedor de Internet de las Cosas y plataformas de realidad aumentada. Lathan fue elegida Joven Líder Global y Pionera Tecnológica por el Foro Económico Mundial, y de 2016 a 2018 fue presidenta del Consejo de Perfeccionamiento Humano.

Geoffrey Ling, coronel retirado del Ejército de EE.UU., es profesor de neurología en la Universidad de Ciencias de la Salud de los Servicios Uniformados y en la Universidad Johns Hopkins. Es también vicepresidente interino de investigación en neurociencias en el Centro Médico Inova Fairfax y socio de Ling & Associates. Experto en desarrollo de tecnología y transición comercial, ha ocupado cargos de dirección en la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa y en la Oficina de Ciencia, Tecnología y Política de la Casa Blanca durante el mandato de Barack Obama. Ha sido miembro del Consejo de Neurotecnologías del Foro Económico Mundial (2016-2018).

Andrew Maynard es director del Laboratorio de Innovación en Riesgos de la Universidad Estatal de Arizona y autor del libro *Films from the future: The technology and morality of sci-fi movies*. Su trabajo se centra en el desarrollo y uso responsable de tecnologías emergentes. Ha sido miembro del Consejo de Tecnología, Valores y Política (2016-2018) y del Consejo de Gobernanza Ágil (2018-2019) del Foro Económico Mundial.

Elizabeth O'Day es directora ejecutiva y fundadora de Olaris Therapeutics, empresa especializada en medicina de precisión ubicada en Cambridge (Massachusetts), y copresidenta del Consejo de Biotecnología. También ha fundado Lizzard Fashion, Proyecto Chispa, Mujeres en Ciencia y Tecnología, y PhiSB.

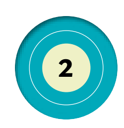
Sang Yup Lee, copresidente del Consejo de Biotecnología desde 2016, es profesor distinguido de ingeniería química y biomolecular en el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de Corea (KAIST). Cuenta en su haber con más de 680 patentes.

AUTORES INVITADOS

Mark Fischetti es editor de *Scientific American* especializado en sostenibilidad.

Alberto Moscatelli es editor de *Nature Nanotechnology*, donde se encarga de artículos sobre nanofotónica y otras áreas. Es doctor en fotoquímica por la Universidad de Columbia.

Andrea Thompson es editora de *Scientific American* especializada en medioambiente y sostenibilidad.



INGENIERÍA

ROBOTS SOCIALES

LOS AYUDANTES Y AMIGOS ROBÓTICOS ESTÁN CADA VEZ MÁS PRESENTES

Por Corinna E. Lathan y Geoffrey Ling

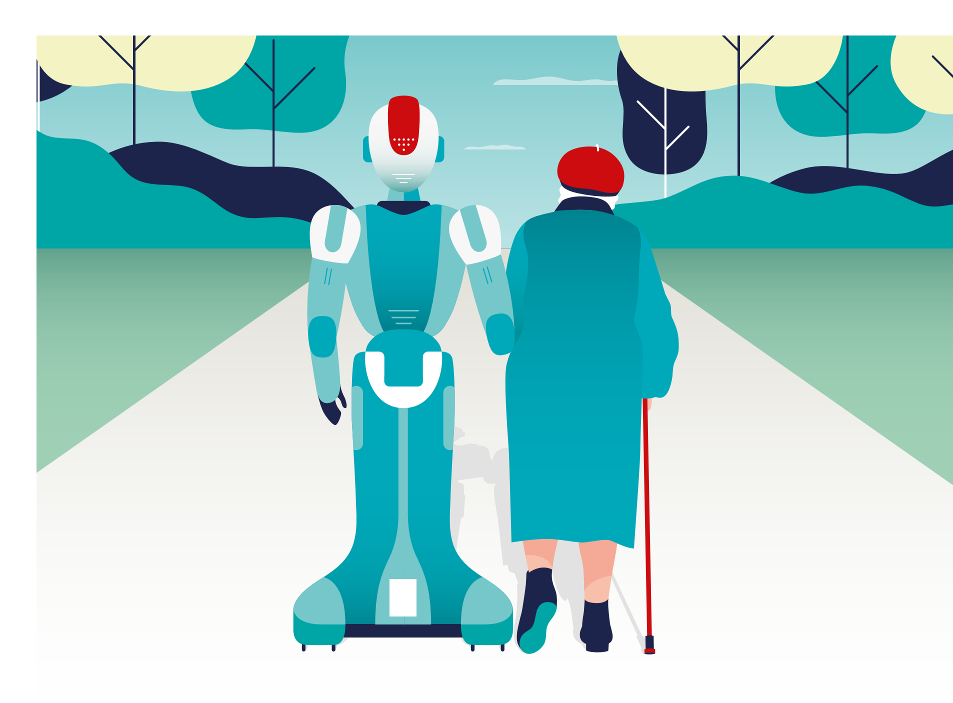
Los robots construyen, desmontan e inspeccionan cosas de forma rutinaria en la industria y la medicina; también ayudan en las operaciones quirúrgicas y dispensan medicamentos en las farmacias. Ni ellos ni los robots sociales (diseñados para relacionarse con la gente y crear un vínculo emocional) se comportan como Robotina, la asistenta de *Los Supersónicos*, u otros androides de la ficción. Aun así, cabe esperar que en los próximos años los robots sociales sean cada vez más avanzados y frecuentes. El campo parece haber alcanzado un punto de inflexión, con robots más interactivos y útiles que nunca.

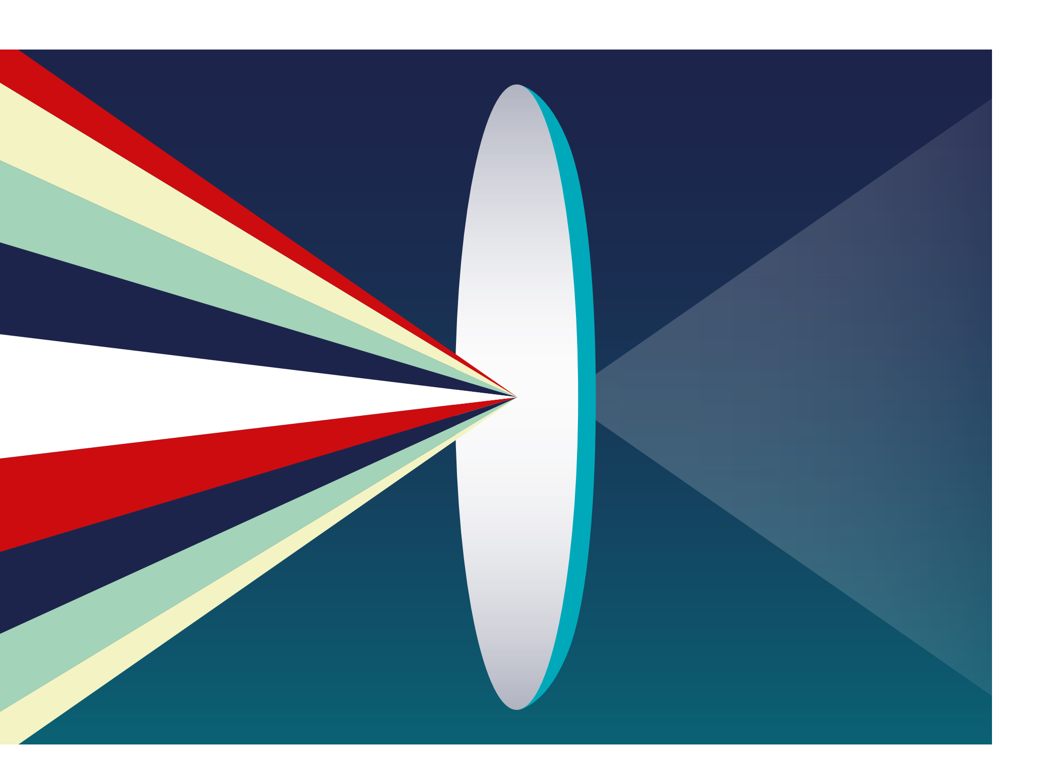
Como la mayoría de los androides, los robots sociales emplean la inteligencia artificial (IA) para decidir cómo actuar en función de los datos que reciben a través de cámaras y otros sensores. Su capacidad para responder de manera natural se basa en investigaciones sobre cómo se forman las percepciones, qué constituye la inteligencia social y emocional y cómo deducimos los pensamientos y sentimientos de los demás. Los avances en IA han hecho posible que los diseñadores trasladen estos conocimientos psicológicos y neurocientíficos a algoritmos que permiten a los robots reconocer voces, rostros y emociones; interpretar el habla y los gestos; responder a señales verbales y no verbales complejas; establecer contacto visual; hablar de forma natural; y adaptarse a las necesidades de la gente, aprendiendo de sus reacciones, recompensas y críticas.

Como resultado, los robots sociales desempeñan cada vez más funciones. Pepper, un humanoide de metro veinte creado por SoftBank Robotics, reconoce rostros y emociones humanas básicas y entabla conversaciones a través de una pantalla táctil instalada en su pecho. En todo el mundo, unas 15.000 unidades Pepper se encargan del registro de huéspedes en hoteles, de la atención al cliente en aeropuertos o de los pedidos en restaurantes de comida rápida. Temi (de Temi USA) y Loomo (de Segway Robotics) representan la próxima generación de asistentes personales: son similares a Amazon Echo y Google Home, pero móviles, lo cual ofrece nuevas posibilidades. Loomo, por ejemplo, no solo es un acompañante, sino que también sirve como medio de transporte.

Los robots sociales presentan especial atractivo como asistentes de la creciente población de personas mayores. El robot terapéutico PARO (desarrollado por el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada de Japón y comercializado en España con el nombre de Nuka), que parece una foca de peluche, tiene como objetivo reducir el estrés y estimular a los enfermos de alzhéimer y otras dolencias en hospitales y residencias de ancianos; responde a su nombre moviendo la cabeza y pide caricias. Mabu (de Catalia Health) ayuda a mejorar el bienestar de los pacientes, principalmente los de mayor edad, recordándoles que den paseos, tomen las medicinas y llamen a sus familiares. También han ganado terreno entre los consumidores los juguetes robóticos. Los primeros modelos a los que se intentó dotar de un comportamiento social, como el Baby Alive de Hasbro o el perro robótico AIBO de Sony, no tuvieron mucho éxito. Pero ahora están resurgiendo: la versión más reciente de AIBO cuenta con un avanzado sistema de reconocimiento de voz y gestos, es capaz de aprender trucos y desarrolla nuevas conductas basadas en interacciones previas.

Las ventas mundiales de robots de consumo ascendieron a unos 5600 millones de dólares en 2018 y se espera que aumenten hasta los 19.000 millones a finales de 2025; se llegarán a vender más de 65 millones de unidades al año. Esta tendencia quizá sorprenda en vista de que muchas compañías bien financiadas, como Jibo y Anki, han fracasado. Pero hay una nueva oleada de robots preparados para ocupar el lugar de los desaparecidos, entre ellos BUDDY (de Blue Frog Robotics), un dispositivo móvil de grandes ojos que, además de jugar, actúa como asistente personal y proporciona seguridad y automatización del hogar.







INGENIERÍA

LENTES DIMINUTAS PARA DISPOSITIVOS EN MINIATURA

LAS METALENTES PODRÍAN REEMPLAZAR AL VIDRIO EN LOS COMPONENTES ÓPTICOS

Por Alberto Moscatelli

Mientras los teléfonos, los ordenadores y otros aparatos electrónicos se vuelven cada vez más pequeños, sus componentes ópticos se niegan obstinadamente a hacer lo propio. En concreto, resulta difícil fabricar lentes de tamaño reducido con las técnicas tradicionales de corte y doblado de vidrio, y a menudo es necesario apilar las lentes para enfocar la luz correctamente. Las metalentes, una alternativa mucho más pequeña y liviana, podrían permitir una mayor miniaturización no solo de microscopios y otros instrumentos de laboratorio, sino también de productos de consumo como cámaras, gafas de realidad virtual y sensores empleados en la Internet de las cosas. Además, podrían mejorar las prestaciones de las fibras ópticas.

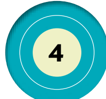
Una metalente es una superficie plana con un grosor inferior a una micra y cubierta de un conjunto de elementos nanoscópicos, como «columnas» y orificios, que forman un determinado patrón. Cuando la luz incide sobre estas estructuras, se modifican muchas de sus propiedades, como la polarización, la intensidad, la fase y la dirección de propagación. Colocando de manera precisa los elementos nanoscópicos, es posible conseguir que la luz que emerge de la metalente posea las características deseadas. Además, las metalentes son tan finas que pueden superponerse varias sin que el tamaño aumente de manera significativa. Los investigadores ya han usado conjuntos de estas superficies planas para construir dispositivos ópticos como espectrómetros y polarímetros.

El año pasado se logró un importante avance: resolver el problema de la aberración cromática. Cuando la luz blanca atraviesa una lente típica, los rayos de distintas longitudes de onda se desvían en diferentes ángulos y eso hace que converjan a diferentes distancias de la lente; para contrarrestar este efecto, los ingenieros deben disponer las lentes en capas alineadas meticulosamente. Pero ahora, una sola metalente «acromática» puede enfocar todas las longitudes de onda de la luz blanca en un mismo punto. Los científicos también han desarrollado metalentes que corrigen otras aberraciones, como la coma y el astigmatismo, que provocan que las imágenes aparezcan distorsionadas y borrosas.

Las metalentes deberían servir para reducir no solo el tamaño, sino también el coste de los componentes ópticos, puesto que pueden fabricarse con herramientas que ya se emplean en la industria de los semiconductores. Esto ofrece la atractiva perspectiva de poder fabricar al mismo tiempo, por ejemplo, los componentes ópticos y electrónicos de un pequeño sensor de luz.

Pero de momento los costes siguen siendo elevados, debido a la dificultad de colocar de manera precisa los elementos nanoscópicos en chips que tienen dimensiones de centímetros. También habrá que superar otras limitaciones. Las metalentes aún no transmiten la luz de forma tan eficaz como las lentes tradicionales, un aspecto importante para producir imágenes a todo color. Además, su pequeño tamaño no permite captar grandes cantidades de luz, lo que implica que, al menos por ahora, no permiten realizar fotografías de alta calidad.

A pesar de todo, es muy probable que, en breve, estas minúsculas lentes se empleen en sensores más pequeños y fáciles de fabricar, instrumentos de diagnóstico como los endoscopios y las fibras ópticas. Estas posibles aplicaciones son lo bastante atractivas para que agencias gubernamentales y compañías como Samsung y Google apoyen su desarrollo. Al menos una empresa emergente, Metalenz, espera lanzar metalentes al mercado en los próximos años.





FÁRMACOS QUE ACTÚAN SOBRE PROTEÍNAS DÚCTILES

NUEVAS POSIBILIDADES PARA TRATAR EL CÁNCER Y OTRAS ENFERMEDADES

Por Elizabeth O'Day

Hace décadas, se identificó un tipo peculiar de proteínas asociadas a enfermedades que engloban desde el cáncer hasta trastornos neurodegenerativos. Estas proteínas eran dúctiles (*intrinsically disordered proteins*) y parecían distintas de las proteínas habituales en las células, de estructura fija. Cambiaban de forma y aparecían como un ensamblado de componentes cuya configuración variaba continuamente. Esta estructura relajada les permite combinarse con una amplia variedad de moléculas en ciertos momentos críticos, como durante la respuesta celular al estrés; por el contrario, las proteínas menos flexibles suelen unirse solo a un número limitado de ligandos.

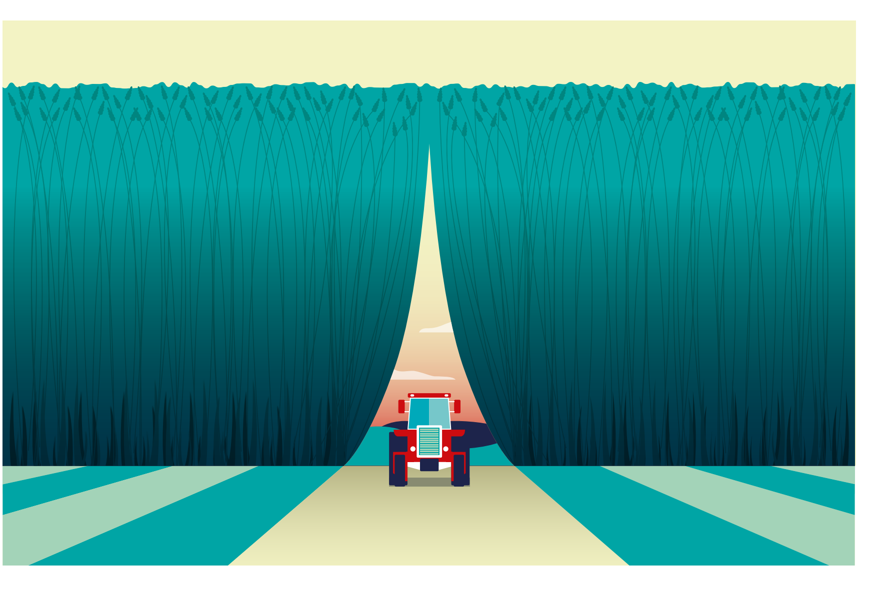
Un funcionamiento indebido de las proteínas dúctiles puede derivar en enfermedades. No obstante, los investigadores médicos no han conseguido desarrollar tratamientos que eliminen o regulen las que son disfuncionales. De hecho, se considera que muchas no pueden modularse con fármacos. Ello se debe a que la mayoría de los medicamentos actuales se dirigen a estructuras estables específicas, y las proteínas dúctiles no mantienen su configuración el tiempo suficiente. Algunas bien conocidas que pueden contribuir al cáncer, como c-Myc, p53 y K-RAS, se han mostrado demasiado escurridizas. Sin embargo, la situación ha empezado a cambiar.

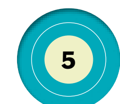
Los científicos están combinando rigurosamente biofísica, potencia computacional y una mejor comprensión del mecanismo funcional de las proteínas dúctiles para identificar compuestos inhibidores de estas, y ya han surgido candidatos a fármacos fiables. En 2017, un grupo de investigadores de la Universidad de Zaragoza y de Aix-Marsella hallaron que es posible apuntar a la variable y difusa superficie de contacto de estas moléculas. Demostraron que un fármaco llamado trifluoperazina (aprobado para tratar trastornos psicóticos y de ansiedad) se une a NUPR1, una proteína dúctil relacionada con un tipo de cáncer de páncreas, e inhibe su acción. Las pruebas de detección sistemática efectuadas para evaluar el potencial terapéutico de miles de fármacos candidatos han revelado algunos que inhiben la proteína c-Myc. Varios de ellos se hallan ya en fase de desarrollo clínico. Asimismo, se han identificado otras moléculas que actúan sobre proteínas como el amiloide beta, implicado en la enfermedad de Alzheimer y otros trastornos.

La lista continuará creciendo, sobre todo a medida que se aclare el papel de las proteínas dúctiles en importantes estructuras celulares conocidas como orgánulos sin membrana. Estas «gotas líquidas», como se las denomina a menudo, en ocasiones aglutinan moléculas celulares vitales, como proteínas y ARN, al tiempo que las aíslan de otras. La proximidad facilita que se produzcan ciertas reacciones; la separación impide que se desarrollen otras. Se han diseñado nuevas y potentes herramientas de manipulación molecular, llamadas Corelets y CasDrop, que permiten controlar la formación de estos agregados. Mediante las citadas herramientas, junto con otras, se ha descubierto que las proteínas dúctiles contribuyen a regular el ensamblaje, la función y la desunión de las gotas.

Se trata de un importante hallazgo, pues durante la formación y la descomposición de las gotas, las proteínas dúctiles interactúan con distintos ligandos y, a veces, al hacerlo, adoptan durante unos momentos nuevas configuraciones. Cabe pensar que quizá resulte más fácil encontrar fármacos capaces de localizar y unirse a estas estructuras que hallar compuestos que actúen sobre las proteínas en sus otras conformaciones. Investigadores de todo el mundo están llevando a cabo trabajos pioneros con el objetivo de desvelar los mecanismos subyacentes.

La industria también apuesta por el potencial terapéutico de las proteínas dúctiles. La empresa biotecnológica IDP Pharma desarrolla un tipo de inhibidor proteico para tratar el mieloma múltiple y el cáncer de pulmón de células pequeñas. Graffinity Pharmaceuticals, que ahora pertenece a NovAliX, ha identificado moléculas que pueden ser dirigidas a la proteína tau, que se asocia a la patología del alzhéimer. Cantabio Pharmaceuticals busca moléculas que estabilicen las proteínas dúctiles implicadas en procesos neurodegenerativos. Y una nueva compañía, Dewpoint Therapeutics, explora la idea de que las gotas y sus componentes dúctiles, debido a la manera en que aglutinan moléculas para potenciar reacciones, podrían servir como dianas de medicamentos. Parece cada vez más probable que en los próximos tres a cinco años estas proteínas, antes intratables farmacológicamente, acaben en el punto de mira del desarrollo farmacéutico.





MEDIOAMBIENTE

ABONOS INTELIGENTES QUE REDUCEN LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

NUEVAS FORMULACIONES APORTAN NUTRIENTES SEGÚN SE REQUIERAN

Por Jeff Carbeck

Para alimentar a la creciente población mundial se precisa que los agricultores aumenten el rendimiento de los cultivos. Podría conseguirse en parte aplicando una mayor dosis de abono; sin embargo, las versiones habituales actúan de manera ineficiente y a menudo dañan el entorno. Por suerte, se dispone de productos ecológicos (fertilizantes de liberación controlada) que son cada vez más inteligentes.

Los agricultores suelen abonar los cultivos de dos formas: rocían los campos con amoníaco, urea u otras sustancias que generan nitrógeno cuando reaccionan con el agua; y aplican gránulos de potasa u otros minerales para producir fósforo, también en reacción con el agua. Sin embargo, solo una cantidad relativamente baja de estos nutrientes llegan a las plantas. Buena parte del nitrógeno se escapa a la atmósfera en forma de gases de efecto invernadero y el fósforo termina en las cuencas hidrográficas, lo que con frecuencia desencadena un crecimiento excesivo de algas y otros organismos. Por el contrario, las formulaciones de liberación controlada aseguran un incremento notable en los niveles de nutrientes que reciben los cultivos, lo que se traduce en mayores rendimientos con dosis menores de abono.

Desde hace tiempo se comercializa un tipo de fertilizante conocido como de liberación lenta. Por lo general, estas formulaciones constan de pequeñas cápsulas llenas de sustancias que contienen nitrógeno, fósforo y otros nutrientes. La envoltura externa reduce la velocidad a la que el agua accede al interior para liberar los nutrientes, así como la velocidad a la que los productos finales escapan de la cápsula. Como resultado, los nutrientes se suministran de forma gradual y no se desperdician como sucede en la liberación rápida, que no permite absorberlos de manera eficiente. Las formulaciones modernas incluyen compuestos que retardan la conversión de las sustancias de partida, como la urea, y retrasan aún más el aporte de nutrientes.

Recientemente, se han desarrollado abonos que responden mejor a la descripción de «liberación controlada», lo cual ha sido posible gracias a la utilización de materiales perfeccionados y técnicas de fabricación que permiten ajustar la envoltura y así modificar la velocidad de liberación de nutrientes según los cambios de temperatura, acidez o humedad del suelo. Combinando diferentes tipos de cápsulas, pueden conseguirse abonos con perfiles adaptados a las necesidades de los cultivos o a las condiciones de crecimiento. Empresas como Haifa Group e ICL Specialty Fertilizers figuran entre las que ofrecen un control más preciso. Haifa, por ejemplo, vincula la tasa de liberación de nutrientes únicamente a la temperatura; cuando esta sube, se aceleran el crecimiento de los cultivos y la emisión de nutrientes.

Si bien las estrategias de liberación controlada logran aumentar la eficacia de los abonos, no eliminan todos los inconvenientes de su uso. Siguen incluyendo productos como amoníaco, urea y potasa. La producción de dichas sustancias consume mucha energía, lo que implica que su fabricación puede contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero y al cambio climático. Sin embargo, el efecto quizá se mitigaría utilizando fuentes de nitrógeno más inocuas para el ambiente y microorganismos que mejoren la eficiencia de la absorción de nitrógeno y fósforo por las plantas. No existen pruebas de que los materiales que componen las cápsulas perjudiquen el entorno, pero se trata de un riesgo que nunca debe perderse de vista, en especial cuando se introducen nuevas sustancias en grandes cantidades.

Los abonos de liberación controlada se engloban dentro del conjunto de prácticas agrícolas sostenibles que constituyen la denominada agricultura de precisión. Esta estrategia mejora las cosechas y minimiza la liberación desmedida de nutrientes al combinar análisis de datos, inteligencia artificial y varios sistemas de sensores para determinar la dosis exacta de abono y agua que necesitan las plantas en un momento dado; también contempla el despliegue de vehículos autónomos que aportan los nutrientes en las cantidades y localizaciones prestablecidas. No obstante, la instalación de sistemas de precisión resulta costosa, por lo que solo suelen disponer de ellos las explotaciones a gran escala. En comparación, los abonos de liberación controlada más avanzados son relativamente baratos y podrían conformar una técnica de vanguardia que ayudaría a los agricultores a aumentar de forma sostenible la cosecha.



COMPUTACIÓN

TELEPRESENCIA COLABORATIVA

LOS PARTICIPANTES EN REUNIONES VIRTUALES SE SENTIRÁN COMO SI ESTUVIERAN EN EL MISMO ESPACIO FÍSICO

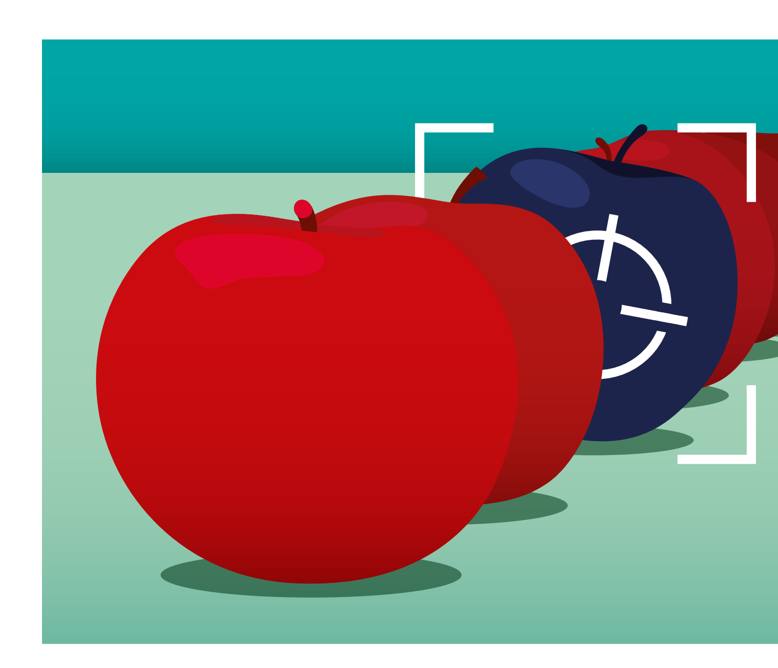
Por Corinna E. Lathan y Andrew Maynard

Imagine un grupo de personas que interactúan desde distintas partes del mundo como si estuvieran en contacto físico, hasta el punto de poder sentir el roce de los demás. Los componentes que permitirán esta «telepresencia colaborativa» podrían transformar el modo en que nos reunimos para trabajar y jugar, convirtiendo en irrelevante nuestra ubicación real.

Las aplicaciones para realizar videollamadas como Skype y FaceTime han puesto al alcance de los consumidores posibilidades que antes pertenecían en exclusiva a la esfera de los negocios, y los juegos multijugador han alterado radicalmente la forma en que nos relacionamos en Internet. De igual modo, la telepresencia colaborativa podría transformar las interacciones virtuales, tanto en el mundo laboral como en otros contextos. Los profesionales de la salud serán capaces de atender a sus pacientes a distancia como si estuvieran en la misma habitación. Y los amigos y las familias podrán juntarse en una acogedora estancia o visitar ciudades nuevas aunque en realidad se encuentren en lugares distintos.

Esta perspectiva es posible gracias a los progresos realizados en diversos ámbitos. Los sistemas de realidad aumentada y realidad virtual son ya suficientemente avanzados y asequibles como para que se extienda su uso. Las compañías de telecomunicaciones están desplegando redes 5G lo bastante rápidas como para manejar sin retardo grandes volúmenes de datos. Se están perfeccionando técnicas innovadoras que facilitan la interacción física con entornos remotos, como los sensores hápticos que nos permiten sentir lo que toca un avatar robótico. La inmersión sensorial completa prevista en la telepresencia colaborativa requerirá tiempos de latencia mucho menores que los aceptables en videollamadas y en ocasiones quizá llegue a desafiar la capacidad de las redes 5G, pero los algoritmos predictivos de inteligencia artificial podrían lograr que el usuario no perciba los desfases.

Si bien la telepresencia colaborativa aún se halla en una fase incipiente, todo está listo para que despegue en un plazo de tres a cinco años. Microsoft y otras empresas ya han empezado a invertir en las tecnologías que sustentarán esta industria, que se espera que mueva miles de millones de dólares para 2025. Y la fundación XPRIZE ha convocado el concurso ANA Avatar XPRIZE, patrocinado por All Nippon Airways y dotado con 10 millones de dólares, para poner en marcha soluciones tecnológicas que «transportarán los sentidos, las acciones y la presencia de un ser humano a lugares remotos en tiempo real y conectarán más el mundo». A medida que las piezas vayan encajando, cabe esperar cambios en la vida diaria y en el trabajo tan espectaculares como los que trajeron los teléfonos inteligentes.





SALUD PÚBLICA

ENVASADO Y SEGUIMIENTO AVANZADO DE ALIMENTOS

UNA COMBINACIÓN DE DOS TÉCNICAS PODRÍA MEJORAR ENORMEMENTE LA SEGURIDAD ALIMENTARIA

Por Rona Chandrawati y Bernard S. Meyerson

Según la Organización Mundial de la Salud, unos 600 millones de personas sufren cada año algún tipo de intoxicación alimentaria y 420.000 de ellas mueren. Cuando se produce un brote, los investigadores pueden pasar días o semanas rastreando su origen. Entretanto, enferman más personas y se desechan, junto con los artículos contaminados, cantidades ingentes de comida en buenas condiciones. Localizar el origen es una labor lenta, pues los alimentos recorren un complejo camino desde la granja hasta la mesa y los registros de cada etapa se guardan en sistemas locales que a menudo no se comunican entre sí.

Combinadas, dos técnicas ayudarían a reducir tanto las intoxicaciones alimentarias como el desperdicio de comida. La primera, una innovadora aplicación de las



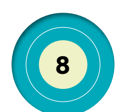
cadenas de bloques (más conocidas por gestionar las monedas virtuales), ha empezado a resolver el problema de la trazabilidad. A su vez, las mejoras en el envasado brindan nuevos medios para determinar si los alimentos se han almacenado a la temperatura adecuada y si han podido empezar a estropearse.

Las cadenas de bloques son un sistema de contabilidad descentralizado en el que las entradas se registran de forma secuencial en múltiples «libros de cuentas» idénticos, que se almacenan en ordenadores ubicados en diferentes lugares. Esta redundancia crea un registro de transacciones de gran fiabilidad, pues hace inútil la manipulación de un único libro. Se ha desarrollado para la industria alimentaria una plataforma en la nube basada en cadenas de bloques, IBM Food Trust, que ya han empezado a probar importantes vendedores de alimentos. (Uno de los autores, Meyerson, está vinculado con IBM.)

Al integrar a productores, distribuidores y minoristas en una cadena de bloques común, Food Trust crea un registro fiable de las etapas que recorre un determinado alimento a través de la cadena de suministro de extremo a extremo. Durante un ensayo, Walmart consiguió rastrear el origen de un artículo «contaminado» en cuestión de segundos; con el método habitual de registros escritos y digitales habría tardado días. Esta capacidad permitirá a minoristas y restaurantes retirar de la circulación un producto contaminado casi de inmediato y destruir solo las existencias que tengan el mismo origen (por ejemplo, un productor de lechuga romana específico) en vez de desecharlas todas. Muchos gigantes alimentarios —Walmart, Carrefour, Sam's Club, Albertsons Companies, Smithfield Foods, BeefChain, Wakefern Food y Topco Associates (una organización de compras colectivas)— se han unido a IBM Food Trust. Otras organizaciones también han implantado la técnica de cadenas de bloques para mejorar la trazabilidad.

A fin de evitar las intoxicaciones alimentarias ya de entrada, diversos centros de investigación y empresas están desarrollando sensores capaces de monitorizar la calidad y seguridad de los alimentos en palés, cajas o envases individuales. Timestrip UK y Vitsab International han creado de forma independiente etiquetas de detección que cambian de color si un producto se expone a temperaturas superiores a las recomendadas; e Insignia Technologies comercializa un sensor que cambia lentamente de color después de abrir un paquete e indica cuándo ha llegado el momento de tirar la comida (el cambio ocurre más rápido si el producto no se conserva a la temperatura adecuada). También están desarrollándose sensores que detectan los subproductos gaseosos que se generan cuando un alimento se estropea. Además de prevenir enfermedades, estos dispositivos reducirían la cantidad de comida desperdiciada, pues señalarían si es seguro consumirla o no.

El coste continúa siendo un obstáculo para que se extienda el uso de estos sensores. Aun así, la necesidad de la industria de garantizar la seguridad alimentaria y reducir los desechos impulsará el progreso de estos dispositivos y de las cadenas de bloques.



ENERGÍA

REACTORES NUCLEARES MÁS SEGUROS

LA ENERGÍA NUCLEAR PODRÍA RESURGIR GRACIAS A INNOVADORES COMBUSTIBLES Y REACTORES

Por Mark Fischetti

Para controlar los niveles de carbono en la atmósfera será necesario explotar una combinación de fuentes de energía, entre las que podría estar la energía nuclear. Aunque esta no produce emisiones de carbono, se considera peligrosa debido a los graves accidentes ocurridos en el pasado. Pero ese riesgo podría reducirse sustancialmente.

Los reactores nucleares comerciales llevan decenios usando el mismo combustible: pequeñas pastillas de dióxido de uranio embutidas en varillas cilíndricas hechas de una aleación de circonio. El circonio permite que los neutrones generados durante la fisión pasen fácilmente entre las barras que se encuentran sumergidas en agua en el núcleo del reactor, lo cual es clave para conseguir una reacción nuclear automantenida que genere calor.

El problema es que si el circonio se calienta en exceso, reacciona con el agua y produce hidrógeno, el cual puede provocar una explosión. Eso es lo que ocurrió en dos de los peores accidentes del mundo: el de la central estadounidense de Three Mile Island en 1979 y el de la central japonesa de Fukushima en 2011. (El accidente de Chernóbil en 1986 se debió a fallos en el diseño y uso del reactor.)

Algunos fabricantes, como Westinghouse y Framatome, están desarrollando combustibles tolerantes a accidentes que son menos propensos a sobrecalentarse y producen cantidades insignificantes de hidrógeno en caso de hacerlo. En algunas variantes, se revisten las vainas de circonio para reducir al mínimo las reacciones. En otras, se sustituyen el circonio e incluso el dióxido de uranio por otros materiales. Apenas haría falta modificar los reactores existentes para usar estas nuevas propuestas, por lo que podrían irse introduciendo ya en la década de 2020, siempre que las exhaustivas pruebas que se están realizando den resultados positivos. Los nuevos combustibles también podrían aumentar la eficiencia de las centrales y abaratar los costes de la energía nuclear, actualmente más cara que la generación solar, eólica y a partir de gas natural.

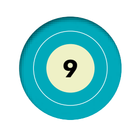
Mientras en EE.UU. la energía nuclear se ha estancado y otros países, como Alemania, desmantelan progresivamente sus centrales, Rusia y China las construyen de manera activa. Estos mercados podrían resultar lucrativos para los fabricantes de nuevos combustibles.

Rusia está desplegando otras medidas de seguridad: las últimas instalaciones construidas dentro y fuera del país por la compañía estatal Rosatom cuentan con modernos

sistemas de seguridad pasiva, capaces de mitigar el sobrecalentamiento incluso si un corte de suministro eléctrico en la planta impide la circulación activa del refrigerante. Westinghouse y otras empresas también han empezado a incorporar elementos de seguridad pasiva en sus diseños.

Los fabricantes también experimentan con reactores de cuarta generación que emplean sodio líquido o sal fundida en vez de agua para transferir el calor de la fisión, con lo que eliminan el peligro de la producción de hidrógeno. China planea conectar un reactor refrigerado con helio a su red eléctrica este mismo año.

En EE.UU., la falta de compromiso político respecto a un almacén geológico profundo permanente para el combustible nuclear gastado ha frenado durante años la expansión de la industria. Pero eso podría estar cambiando: más de una docena de legisladores han propuesto medidas destinadas a reanudar la concesión de licencias para el almacén de Yucca Mountain, en Nevada, considerado el emplazamiento idóneo desde 1987. Mientras, una senadora por Alaska aboga por el uso de los pequeños reactores modulares que se desarrollan en el Laboratorio Nacional de Idaho. (Rosatom también fabrica reactores de dimensiones reducidas.) Y varios estados del oeste han llegado a un preacuerdo con la empresa NuScale Power para construir una planta con una docena de sus reactores modulares. Los combustibles mejorados y el auge de estos reactores compactos podrían conducir a un renacimiento de la energía nuclear.



MEDICINA Y BIOTECNOLOGÍA

EL ADN COMO DISCO DURO

SE ESTÁ ADAPTANDO EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN DE LA VIDA PARA QUE ALBERGUE GRANDES VOLÚMENES DE DATOS

Por Sang Yup Lee

Según la empresa de *software* Domo, en cada minuto de 2018 se realizaron 3,88 millones de búsquedas en Google, se visualizaron 4,33 millones de vídeos en YouTube, se enviaron 159.362.760 correos electrónicos, se escribieron 473.000 tuits y se publicaron 49.000 fotos en Instagram. Se calcula que, en 2020, se crearán 1,7 megaoctetos (*megabytes*) de datos por segundo y persona en todo el mundo, lo cual equivale a unos 418 zettaoctetos en un solo año (información para llenar 418.000 millones de discos duros de un teraocteto de capacidad), suponiendo una población mundial de 7800 millones de personas. Los sistemas de almacenamiento de datos magnéticos u ópticos que en la actualidad dan cabida a este volumen de ceros y unos no sobreviven más de un siglo. Además, el funcionamiento de los centros de datos consume mucha energía. En resumen, nos enfrentamos a un grave problema de almacenamiento que no hará sino empeorar con el tiempo.

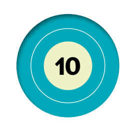
No obstante, se está desarrollando una alternativa a los discos duros: el almacenamiento de datos basado en el ADN. El ADN (formado por largas cadenas de los nucleótidos A, T, C y G) constituye el material que alberga la información de la vida. Los datos pueden codificarse en una secuencia de estas letras, lo que convierte al ADN en una nueva forma de tecnología de la información. La molécula ya se secuencia (lee), sintetiza (escribe) y copia de modo sistemático, con fidelidad y sin dificultades. El ADN también posee una increíble estabilidad, como ha demostrado la secuenciación del genoma de un caballo fósil de hace más de 500.000 años. Además, no se necesita mucha energía para conservarlo.

Pero lo más destacable es su capacidad. El ADN puede almacenar ingentes cantidades de datos a una densidad muy superior a la de los dispositivos electrónicos. La simple bacteria *Escherichia coli*, por ejemplo, ofrece una densidad de almacenamiento de unos 10^{19} bits por centímetro cúbico, según los cálculos publicados por el grupo de George Church, de la Universidad Harvard, en *Nature Materials* en 2016. Con esa densidad, bastaría un cubo de ADN de un metro de lado para satisfacer las necesidades actuales de almacenamiento de todo el mundo durante un año.

La idea de alojar datos en el ADN no es solo teórica. En 2017, el grupo de Church adoptó la técnica de edición genética CRISPR para grabar imágenes de una mano humana en el genoma de la bacteria *E. coli*, las cuales se leyeron con una exactitud superior al 90 por ciento. Por otra parte, investigadores de la Universidad de Washington y Microsoft Research han desarrollado un sistema automatizado para escribir, guardar y leer datos codificados en el ADN. Varias empresas, entre ellas Microsoft y Twist Bioscience, trabajan para impulsar esta técnica.

Entretanto, otros investigadores se afanan en dar sentido a formidables volúmenes de datos y utilizan el ADN para gestionar la información, aunque de una manera distinta. Los recientes avances en los métodos de secuenciación de nueva generación facilitan la lectura simultánea de miles de millones de secuencias de ADN. Con esta capacidad, los investigadores pueden emplear códigos de barras (usando secuencias de ADN como «etiquetas» de identificación molecular) para realizar el seguimiento y control de los resultados experimentales. Los códigos de barras genéticos se utilizan en la actualidad para acelerar el ritmo de las investigaciones en campos como la ingeniería química, la ciencia de materiales y la nanotecnología. En el Instituto Tecnológico de Georgia, el laboratorio de James E. Dahlman está identificando terapias génicas más seguras; otros estudian cómo combatir la resistencia a los medicamentos o prevenir las metástasis.

Entre los inconvenientes que deben superarse para que el almacenamiento de datos en ADN sea una práctica común figuran el coste y los tiempos de lectura y escritura, que necesitan reducirse aún más para poder competir con los dispositivos electrónicos. Aunque el ADN no se convierta en un material de almacenamiento omnipresente, casi con toda certeza se usará para generar información a escalas nunca vistas y preservar ciertos tipos de datos a largo plazo.



ENERGÍA

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA RENOVABLE A GRAN ESCALA

EMPIEZA A DESAPARECER UNO DE LOS OBSTÁCULOS PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Por Andrea Thompson

La forma en que obtenemos electricidad está experimentando una rápida transición, impulsada tanto por la apremiante necesidad de descarbonizar el sector energético como por el desplome de los costes de las energías eólica y solar. En EE.UU. (país al que recurriremos a lo largo del texto a modo de ejemplo), la generación de electricidad a partir de fuentes renovables se ha duplicado en el último decenio, gracias sobre todo a las instalaciones eólicas y solares, según la Administración de Información Energética (EIA) de ese país. En enero de 2019, dicha agencia pronosticó que las energías renovables no hidroeléctricas serían las que más crecerían en los dos años siguientes. Pero la naturaleza intermitente de estas fuentes obliga a las compañías eléctricas a encontrar un modo de reservar energía para cuando no brille el sol y no sople el viento. Eso ha hecho que aumente el interés por los sistemas de almacenamiento de energía, en concreto por las baterías de iones de litio, que finalmente están listas para desempeñar un papel más importante en la red de suministro.

Durante décadas, el principal método para almacenar energía a gran escala ha sido el hidrobombeo, un sencillo proceso basado en la existencia de depósitos de agua a distintas alturas. Para acumular energía, se bombea agua al embalse superior; y para recuperarla, se deja caer el agua a través de una turbina hasta el embalse inferior. El 95 por ciento de la energía almacenada a gran escala en EE.UU. emplea este método, según el Departamento de Energía. Sin embargo, las baterías de iones de litio han aflorado conforme han aumentado su eficiencia y fiabilidad y han disminuido sus costes de fabricación. En EE.UU. representan ya más del 80 por ciento de la capacidad de almacenamiento de energía a gran escala en baterías, que ha pasado de unos pocos megavatios hace una década a 866 megavatios en febrero de 2019, según la EIA. Un análisis realizado en marzo de 2019 por la consultora Bloomberg New Energy Finance afirma que el coste total de la electricidad procedente de estas baterías ha caído un 76 por ciento desde 2012, con lo que estarían cerca de poder competir con las centrales (generalmente de gas natural) que se activan cuando crece la demanda eléctrica. Hasta la fecha, las baterías se han usado sobre todo para realizar ajustes breves y rápidos destinados a mantener los niveles de energía, pero en varios estados de EE.UU. las compañías eléctricas ya han empezado a incorporar baterías de iones de litio que duran entre dos y cuatro horas. La consultora energética Wood Mackenzie calculó que el mercado de almacenamiento de energía se duplicaría de 2018 a 2019 y se triplicaría de 2019 a 2020.

De acuerdo con los expertos, las baterías de iones de litio podrían ser la tecnología dominante durante los próximos cinco o diez años. Las continuas mejoras resultarán en dispositivos capaces de almacenar entre cuatro y ocho horas de energía, lo que permitiría emplear la energía de origen solar durante el pico de demanda nocturno.

Sin embargo, esa duración es insuficiente si queremos que las fuentes renovables y el almacenamiento energético suministren la carga base (el nivel mínimo de demanda) de la red eléctrica, lo que obliga a buscar alternativas a las baterías de iones de litio. Las posibilidades abarcan desde las baterías de flujo (que bombean electrolitos líquidos) y las pilas de combustible de hidrógeno hasta conceptos más simples, como el hidrobombeo o el almacenamiento por gravedad. Las centrales de hidrobombeo (o hidroeléctricas reversibles) son baratas una vez instaladas, pero su construcción es costosa y solo pueden levantarse en ciertos terrenos. El concepto del almacenamiento por gravedad es igual de simple: los excedentes de energía se emplean para elevar un bloque pesado, que más tarde puede descender para impulsar una turbina y generar electricidad. Sin embargo, esta idea aún no ha despegado, a pesar de que algunas empresas están trabajando en ella y han atraído inversores. Otras opciones aún no son lo bastante fiables o eficientes, o no pueden competir en costes con las baterías de iones de litio.

De acuerdo con la EIA, a finales de 2017 EE.UU. solo tenía tres sistemas de almacenamiento a gran escala basados en baterías de flujo, y los sistemas de hidrógeno a gran escala aún se hallan en fase de demostración. El Gobierno de EE.UU. financia algunos estudios en este campo, principalmente a través de la Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación en Energía (ARPA-E); sin embargo, buena parte de las investigaciones e inversiones en estas tecnologías —y en el almacenamiento energético en general— se concentran en China y Corea del Sur.

No está claro si los costes del almacenamiento energético continuarán disminuyendo y en qué medida lo harán. Pero los compromisos adquiridos por los Gobiernos en materia medioambiental servirán de acicate para poner en marcha cada vez más sistemas de este tipo.

EN NUESTRO ARCHIVO

El caos ordenado de las proteínas. A. Keith Dunker y Richard W. Kriwacki en *IyC*, junio de 2011.

Sistemas de almacenamiento energético. Ferdi Schüth en *IyC*, septiembre de 2012.

Los metamateriales se acercan al mercado. Lee Billings en *IyC*, febrero de 2014.

La era de la informática universal. Gershon Dublon y Joseph A. Paradiso en *IyC*, septiembre de 2014.

Robots empáticos. Pascale Fung en *IyC*, enero de 2016.

El impacto social de las cadenas de bloques. Natalie Smolenski en *IyC*, marzo de 2018.

Reinventar el combustible nuclear. Rod McCullum en *IyC*, agosto de 2019.

Un archivo universal que cabría en un huevo. James E. Dahlman en *IyC*, enero de 2020.

FÍSICA

ALBA: Luz de sincrotrón para investigar la materia



VISTA AÉREA del sincrotrón ALBA, junto al campus de la Universidad Autónoma de Barcelona. El anillo del acelerador tiene un perímetro de 268 metros.

Una de las mayores infraestructuras científicas españolas cumple diez años. Sus contribuciones han permeado todos los campos de la ciencia, desde la biología hasta la física de materiales

Caterina Biscari, Gastón García, Ana Belén Martínez y Ramon Pascual



Caterina Biscari es directora del sincrotrón ALBA y presidenta de la Liga Europea de Fuentes de Fotones basadas en Aceleradores (LEAPS).

Ana Belén Martínez es responsable de comunicación y divulgación del ALBA.

Gastón García es director del Centro de Microanálisis de Materiales de la Universidad Autónoma de Madrid. Fue subdirector del ALBA hasta 2019.



Ramon Pascual es físico del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE), catedrático emérito de la Universidad Autónoma de Barcelona y promotor del ALBA, del que es presidente honorario.

DESDE LOS PRIMITIVOS TUBOS DE VACÍO CONCEBIDOS A FINALES DEL SIGLO XIX hasta el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, los científicos llevan más de un siglo utilizando los aceleradores de partículas. Aunque muy distintos entre sí, hoy el número de estos dispositivos supera los 30.000 en todo el mundo y su uso abarca áreas tan diversas como la industria, la medicina, el análisis de obras de arte o la física fundamental.

A pesar del desarrollo experimentado a lo largo de los años, el principio básico de estos instrumentos sigue siendo el mismo. Se aceleran partículas (por lo general estables, como electrones o protones) mediante campos eléctricos y después sus haces se dirigen y focalizan mediante campos magnéticos. Existen dos grandes tipos de aceleradores: los lineales, en los que la trayectoria de las partículas es recta y estas pasan una sola vez por las cavidades aceleradoras; y los circulares, donde las partículas describen un camino cerrado y pasan múltiples veces por las cavidades, lo que permite su aceleración progresiva. A esta segunda clase pertenecen los sincrotrones.

Si el objetivo es lograr la máxima aceleración posible, los sincrotrones presentan la desventaja de que, en los tramos curvos de la trayectoria, las partículas pierden parte de su energía, la cual emiten en forma de radiación electromagnética. Sin embargo, este fenómeno puede convertirse en una herramienta de extraordinaria utilidad para otros fines. Todo análisis de la materia exige iluminar las muestras con luz. Y la llamada luz de sincrotrón, la energía «perdida» que acabamos de mencionar, resulta excelente para dicho propósito. Ello se debe a que puede generarse en todas las zonas del espectro (desde el infrarrojo a los rayos X), así como a su gran intensidad, coherencia y polarización. Desde los años sesenta del pasado siglo, estas propiedades han convertido a los sincrotrones en potentes «microscopios» para estudiar todo tipo de materia a escalas atómicas y moleculares, así como en una herramienta clave en nanociencia y nanotecnología.

A comienzos de los años noventa del siglo pasado, el físico Juan Antonio Rubio, por entonces asesor científico en el CERN, lideró los esfuerzos para compensar el déficit español en ciencia y tecnología de aceleradores. Fue entonces cuando cristalizaron las primeras ideas para disponer de un sincrotrón propio que complementase la participación española en el proyecto de una fuente de luz europea, el actual Laboratorio Europeo de Radiación de Sincrotrón (ESRF) de Grenoble.

Tras unos años de evaluación y toma de decisiones, en 2003 se constituyó el Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz de Sincrotrón (CELLS) y se aprobó la construcción del sincrotrón ALBA en Barcelona, cofinanciado a partes iguales por las administraciones catalana y española. Dicho acuerdo fue acompañado del correspondiente estudio de impacto y análisis económico, el cual arrojó resultados positivos sobre su rentabilidad. Ajustándose al calendario y presupuesto previstos, la instalación comenzó a construirse en 2006, se inauguró en marzo de 2010 y recibió sus primeros usuarios oficiales en 2012. Con un coste total de construcción de 200 millones de euros (un millón menos de lo presupuestado) y unos gastos actuales de mantenimiento de unos 25 millones al año, se trata de una de las mayores inversiones científicas jamás realizadas en España.

EN SÍNTESIS

Las fuentes de luz de sincrotrón son aceleradores de partículas que sirven como potentes microscopios para examinar la materia a escalas atómicas y moleculares. Estas grandes instalaciones se emplean hoy en todos los campos de la ciencia.

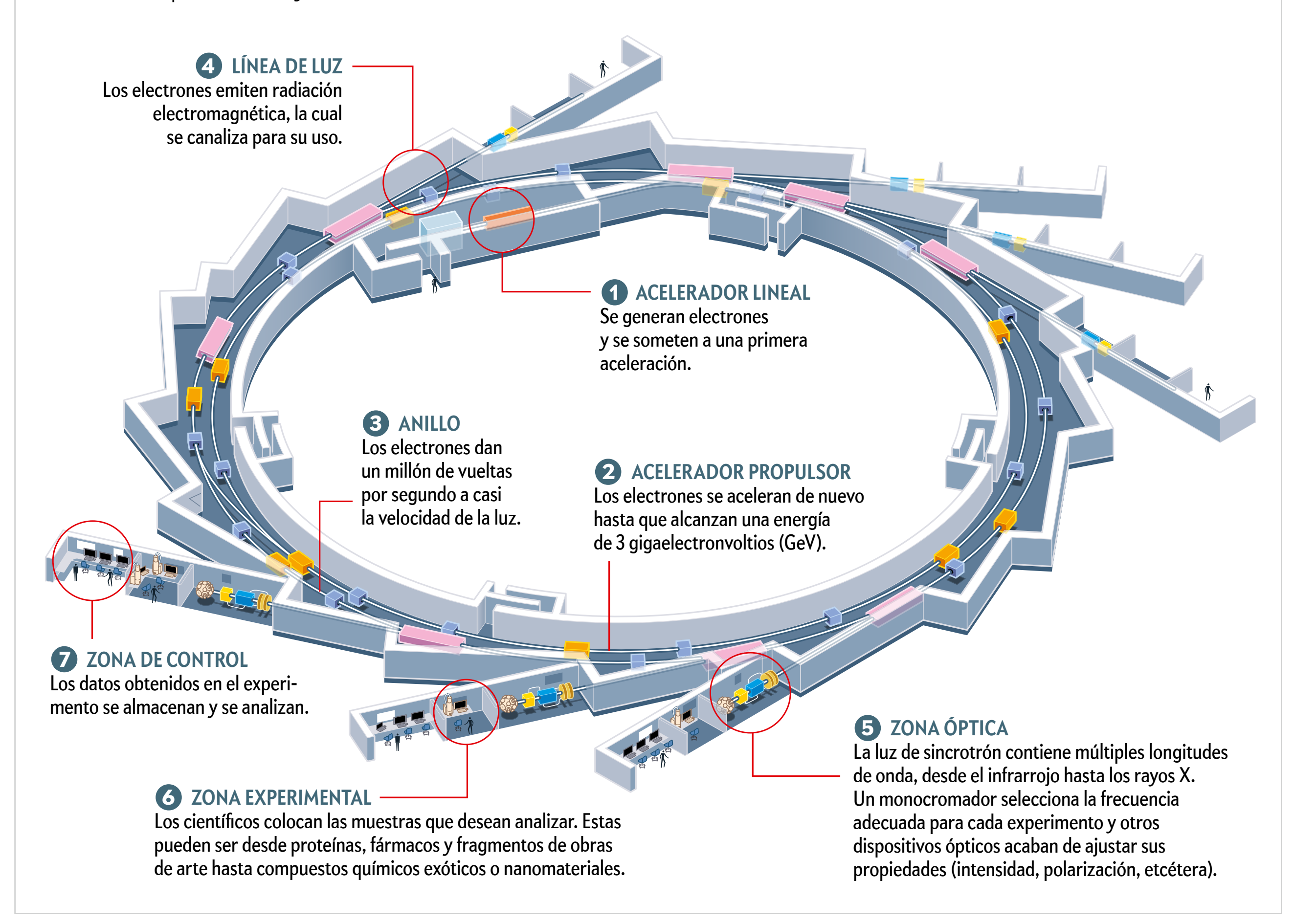
El sincrotrón ALBA fue inaugurado en Barcelona hace ahora diez años. Uno de los instrumentos de este tipo más avanzados de Europa, cada año recibe la visita de más de 2000 científicos procedentes de todo el mundo.

En este tiempo, la instalación ha permitido avances que van desde la investigación de la malaria y el diseño de nuevas baterías hasta la descontaminación de aguas, el desarrollo de nuevos materiales o la conservación del patrimonio artístico.

PÁGINAS ANTERIORES: ALBA CELLS

Luz de sincrotrón

Una fuente de luz de sincrotrón funciona como un gigantesco microscopio. En ALBA se aceleran electrones a velocidades próximas a la de la luz (1-3) y se aprovecha la radiación electromagnética que emiten (4) para irradiar la materia y analizarla a escalas atómicas y moleculares (5-7). Para ello, a lo largo del anillo de aceleración se instalan distintas «líneas de luz» (*salidas tangenciales*), extensiones que colectan radiación electromagnética emitida por los electrones y en cuyos extremos se disponen las estaciones experimentales y de análisis de datos.



ALBA

Hoy el sincrotrón ALBA pertenece a la media docena de instrumentos equivalentes existentes en los países más avanzados de Europa. Consta de dos aceleradores que inyectan un haz de electrones de 3 gigaelectronvoltios (GeV) en un anillo de 268 metros de longitud. Esos haces son los que emiten la radiación de sincrotrón que alimenta las distintas «líneas de luz», en cuyos extremos se disponen las estaciones experimentales donde los usuarios colocan las muestras que desean analizar. En la actualidad, el ALBA dispone de ocho líneas de luz, la última de ellas operativa desde 2016, que alimentan doce estaciones experimentales. A ellas se sumarán otras cuatro líneas de luz que ya están en construcción y que comenzarán a funcionar entre 2020 y 2023.

FUENTE DE TECNOLOGÍA

Además de las líneas de luz, el ALBA dispone de varios laboratorios adicionales, como el laboratorio de radiofrecuencia o el de medidas magnéticas. Este, por ejemplo, que sirvió para calibrar los electroimanes del ALBA, se ha usado también para poner a punto los electroimanes de los sincrotrones de Canadá, Australia y Oriente Medio, entre otros. Y el laboratorio de metrología permite caracterizar superficies ópticas ultraprecisas, imprescindibles en los espejos o monocromadores (analizadores de la composición de la luz en función de su longitud de onda) de las líneas de luz de sincrotrón o de los láseres de electrones libres. En los últimos años, el ALBA ha adquirido una amplia experiencia en este tipo de colaboraciones con otras grandes infraestructuras científicas o con empresas suministradoras.

Una característica peculiar del ALBA es su sistema de control, encargado de conectar los programas informáticos con el equipo físico para regular el instrumental de los aceleradores, las líneas de luz y el sistema de adquisición de datos. Dicho sistema de control se basa en TANGO, una colaboración internacional de código abierto usada en sincrotrones, láseres y otros experimentos de todo el mundo, la cual permite adaptar y configurar de manera flexible el gran número de dispositivos presentes en cada instalación. El ALBA es uno de los miembros de TANGO y colabora junto con otros sincrotrones en su desarrollo.

Continúa en la página 44

Diez años iluminando la ciencia

El sincrotrón ALBA, situado en las inmediaciones de Barcelona, fue inaugurado en marzo de 2010 y recibió sus primeros usuarios oficiales en 2012. Los miles de experimentos efectuados desde entonces en la instalación han dado lugar a más de 1600 publicaciones científicas y han aportado más de 400 estructuras de proteínas a las bases de datos. La variedad de los retos abordados es enorme e incluye áreas como la salud, la preservación del entorno natural, la búsqueda de nuevas fuentes de energía, la conservación del patrimonio artístico o el desarrollo de nuevos dispositivos de almacenamiento de datos, entre otras muchas. Aunque es prácticamente imposible resumir los miles de resultados cosechados hasta ahora, a continuación se presentan algunos hallazgos representativos y con especial impacto para la sociedad.

ENERGÍA

Baterías de litio de nueva generación

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta nuestra sociedad es el relacionado con la producción y almacenamiento de energía. Hoy numerosos aparatos usan baterías recargables de iones de litio, cuya invención se vio recompensada el año pasado con la concesión del premio Nobel de química. Estos dispositivos se basan en el transporte de iones entre al ánodo y el cátodo durante los procesos de carga y descarga.

Muchas de las baterías de litio usadas en la actualidad poseen un cátodo con un elevado contenido de cobalto. Este elemento es caro, contaminante y limita la capacidad del dispositivo, por lo que existe un gran interés en desarrollar baterías libres de él. Para ello, es necesario estudiar con detalle los procesos de síntesis de las capas de óxidos que se emplean como cátodos. En febrero de 2019, una colaboración formada por científicos de ALBA y de instituciones alemanas, chinas y australianas publicó nuevos resultados sobre la síntesis de capas de óxidos ricas en litio y carentes de cobalto. El trabajo ocupó la portada de *Advanced Energy Materials*.

Lo que lograron los científicos fue diseñar un método aplicable a gran escala y basado en una etapa de precipitación seguida de una de calentamiento por microondas. La luz de sincrotrón de ALBA y del Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY), en Hamburgo, permitió estudiar las reacciones en tiempo real y determinar los cambios en la estructura del cátodo, así como efectuar medidas de microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de resonancia magnética nuclear y estudios electroquímicos. El hito podría servir para avanzar en el diseño de una nueva generación de baterías bajas en cobalto, que funcionen a altos voltajes y con una capacidad elevada, lo que permitiría almacenar más energía en baterías más pequeñas y con una menor duración del proceso de carga.

QUÍMICA INDUSTRIAL

Mejora del hormigón

Los beneficios de ALBA no se limitan a la ciencia básica. Entre los muchos ejemplos de aplicaciones para la industria, una investigación llevada a cabo por investigadores de ALBA, la Universidad Politécnica de Cataluña y la empresa química BASF ha dado lugar a un nuevo método para producir mejores aditivos para el hormigón. Los resultados se publicaron en febrero de 2019 en *Cement and Concrete Research*.

Los compuestos conocidos como superplastificantes de policarboxilato permiten que el cemento gane fluidez, lo que mejora su manejabilidad al tiempo que reduce el consumo de agua. Sin embargo, son muy sensibles a las arcillas que pueda contener la arena usada en la producción. La luz de sincrotrón de ALBA ha permitido entender cómo se comporta la pasta fresca de cemento y, con ello, la interacción entre el policarboxilato y las arcillas.

PARASITOLOGÍA

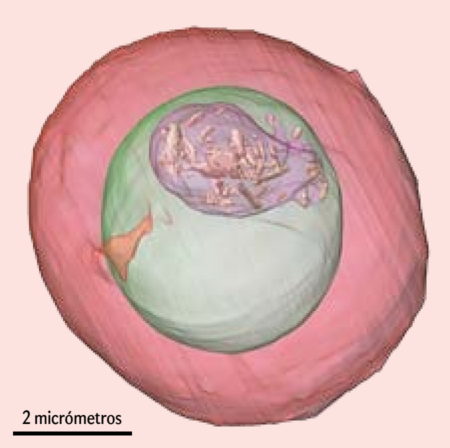
Comprender y frenar la malaria

La malaria afecta a centenares de millones de personas en todo el mundo, muchas de ellas niños. Los fármacos que se emplean para su tratamiento no suelen resultar eficaces, ya que, tras un uso continuado, el patógeno desarrolla resistencias. En la búsqueda de alternativas, una de las estrategias consiste en conocer mejor el proceso de infección para diseñar fármacos que bloqueen su desarrollo.

El causante de la malaria es el parásito *Plasmodium falciparum*, el cual se transmite a través de picaduras de mosquito, llega a la sangre e infecta los glóbulos rojos. Una vez en el interior de las células, se nutre de la hemoglobina y, al digerirla, genera residuos de hierro en forma de ciertas moléculas llamadas hemo. Dichas moléculas son tóxicas para el parásito, pero este emplea una estrategia que evita que le perjudiquen: las junta de dos en dos y las agrupa formando cristales de hemozoína, lo que las torna inofensivas. Para que todo funcione, es necesario que los ritmos de producción de hemos y el de cristalización estén coordinados, a fin de que la sustancia tóxica no se acumule en el parásito.

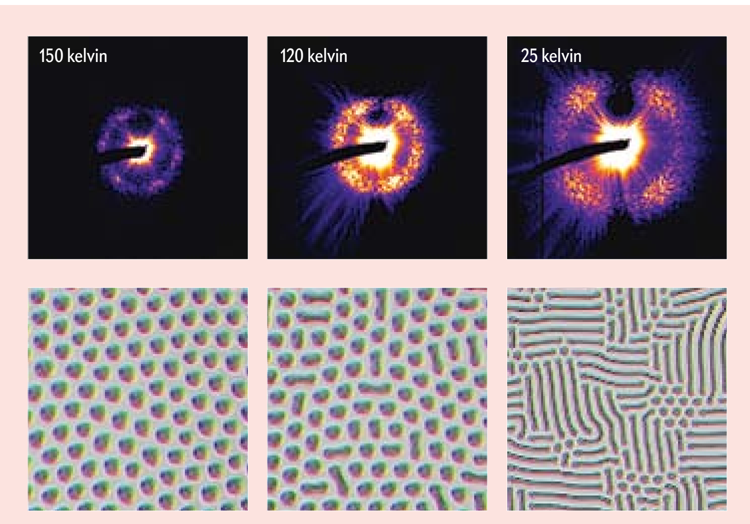
Aún no se conoce con exactitud la manera en que el parásito consigue cristalizar las moléculas hemo. En 2017, un grupo de la Universidad de Copenhague midió por vez primera la velocidad del proceso de cristalización gracias a dos técnicas avanzadas: la microscopía de transmisión de rayos X blandos, lograda en las líneas de luz de ALBA y del sincrotrón berlinés BESSY II; y la microscopía de fluorescencia de rayos X, llevada a cabo en el sincrotrón suizo SLS y en el ESRF de Grenoble.

Dichos experimentos permitieron observar la concentración de las diferentes moléculas y compararla con las predicciones de los modelos. El hallazgo reviste una gran utilidad para el diseño de nuevos fármacos concebidos para desbaratar el proceso de gestión de residuos del parásito, ya sea impidiendo la reacción que empaqueta las moléculas hemo o causando que estas se acumulen en gran número.



Reconstrucción tridimensional del parásito de la malaria (*verde*) en el interior de un glóbulo rojo (*rosa*) obtenida gracias a experimentos de microscopía de rayos X efectuados en ALBA. En el parásito se observa una vacuola digestiva (*violeta*) donde se concentran los cristales de hemozoína.

DE: «BIOCHEMISTRY OF MALARIA PARASITE INFECTED RED BLOOD CELLS BY X-RAY MICROSCOPY», POR SERGEY KAPISHNIKOV ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 7, ART. 802, ABRIL DE 2017.



Patrones de dispersión de rayos X blandos medidos en una muestra de $Co_8Zn_8Mn_4$ a diferentes temperaturas (*arriba*). Los cambios registrados permiten inferir, mediante simulaciones, el comportamiento magnético del material (*abajo*).

MATERIALES

Nuevas memorias magnéticas

Los skyrmiones magnéticos (así llamados en honor al físico Tony Skyrme, quien los estudió matemáticamente en los años sesenta del siglo pasado) son nanoestructuras con forma de remolino que aparecen en ciertos materiales. Hace tiempo que se consideran candidatos prometedores para codificar las unidades básicas de información (bits) de los futuros dispositivos de memoria, ya que presentan un bajísimo consumo energético y permitirían una densidad de almacenamiento superior a la de los aparatos actuales. Sin embargo, materializar este objetivo implica conocer con detalle la dinámica y las propiedades estructurales de los skyrmiones.

En 2019, investigadores de varios centros japoneses, del Instituto Paul Scherrer suizo y del sincrotrón ALBA analizaron un compuesto de cobre, zinc y manganeso que presenta distintas fases magnéticas, una de ellas con skyrmiones. Las mediciones permitieron obtener imágenes con una resolución de pocos nanómetros de la textura magnética del material y analizar su evolución en el intervalo de temperaturas de entre 20 y 150 kelvin. Al hacerlo, fue posible observar un alargamiento de los skyrmiones a lo largo de los principales ejes cristalográficos del material, lo que reveló su disposición y comportamiento.

MEDIOAMBIENTE

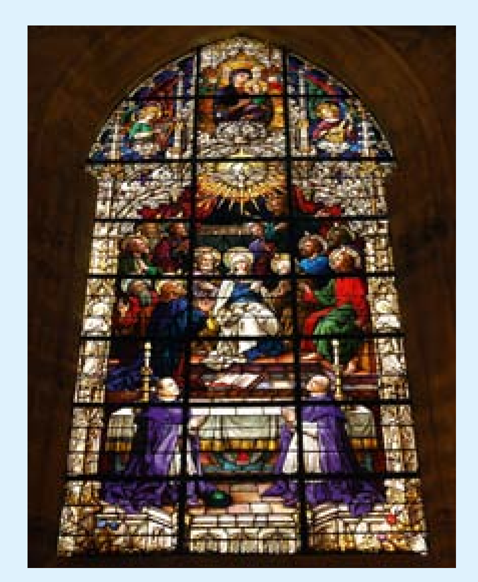
Limpieza y reciclaje de aguas contaminadas

La contaminación por metales pesados constituye un motivo de inquietud en todos los países. Especialmente preocupante resulta la contaminación de aguas residuales por metales como cobre, cadmio, plomo o cromo. Este último, bajo la forma Cr^{6+}, es uno de los más problemáticos dada su alta toxicidad y puede acabar en el agua debido sobre todo a los procesos de tinción de las industrias textil y peletera.

Un material orgánico con capacidad para adsorber metales del medio es la biomasa. Dicho proceso de adsorción se basa en la retención de los contaminantes en una superficie sólida. De entre todas las técnicas de separación empleadas para extraer metales pesados de aguas contaminadas, la adsorción constituye una de las más ventajosas debido a su elevada eficiencia, bajo coste y fácil manejo.

En 2018, científicos de ALBA y de la Universidad Autónoma de Barcelona estudiaron la posibilidad de usar como adsorbente biomasa de pino y materiales derivados, como el biochar (biomasa tratada a altas temperaturas) y la biomasa con partículas de óxido de titanio. Una vez pulverizadas, estas sustancias se pusieron en contacto con aguas contaminadas y sus muestras se analizaron posteriormente en ALBA mediante espectroscopía de absorción de rayos X.

Los trabajos preliminares han mostrado que la biomasa con óxido de titanio presenta una mayor capacidad de adsorción para los materiales estudiados, lo que facilitará el desarrollo de nuevos sistemas de tratamiento de aguas. Además, la misma técnica podría permitir recuperar los metales atrapados por la biomasa y, con ello, su reutilización por parte de la industria.



Vidriera interior de la catedral de Segovia.

PATRIMONIO ARTÍSTICO

Mejora en la conservación de vitrales

Las grisallas son capas pictóricas concebidas para crear el efecto de sombras y volúmenes, que, a lo largo de los siglos, se han empleado en los vitrales de catedrales e iglesias. Para ello se usaba un pigmento (por lo general de hierro) mezclado con un fundente (óxido de plomo o de boro) que se fijaba al vidrio con fuego.

En los siglos XV y XVI se impulsó la construcción de grandes catedrales góticas en Castilla y Andalucía. La catedral de Segovia presenta una de las colecciones más completas de vitrales originales de los siglos XVI, XVII y XX. Sin embargo, los restauradores han comprobado que no todos ellos se han conservado igual de bien. En marzo de 2016, la luz de sincrotrón reveló el proceso de fabricación de cada uno, gracias a lo cual será posible diseñar mejores estrategias de conservación.

Tras una serie de experimentos efectuados en ALBA y cuyos resultados se publicaron en *International Journal of Applied Glass Science*, investigadores de la Universidad Politécnica de Cataluña y de las universidades de Valencia, Vic y Cranfield lograron identificar los compuestos de distintas muestras. El equipo descubrió que, en el siglo XVI, se usaba un vidrio que podía soportar temperaturas muy elevadas sin deformarse. Pero eso no ocurría con las obras del siglo XVII, por lo que los maestros vidrieros debían añadir más fundentes a las grisallas para así poder fijarlas a menor temperatura. Eso dio lugar a grisallas con un exceso de óxido de plomo, lo que provocaba que no se adhiriesen adecuadamente y acabasen desprendiéndose. Las del siglo XX están fijadas a mayor temperatura pero muy vitrificadas y con bastante porosidad, lo que con el tiempo podría causar problemas.

Viene de la página 41

Las capacidades técnicas del ALBA son también de gran valor para otros centros. Por ejemplo, el ALBA ha diseñado y construido las cámaras de vacío del Centro de Láseres Pulsados (CLPU) de Salamanca, que alberga uno de los diez láseres más potentes del mundo y el único en España capaz de alcanzar una potencia de un petavatio. De hecho, se han patentado algunos de los diseños de ALBA y se han establecido acuerdos con empresas externas para canalizar su comercialización.

Los parámetros que miden la fiabilidad del ALBA, como la disponibilidad del haz, el tiempo medio entre fallos y el tiempo medio de recuperación, lo sitúan entre las mejores fuentes de luz de sincrotrón del mundo. Conseguir buenos resultados en este aspecto resulta crucial para garantizar que los experimentos puedan realizarse en condiciones óptimas y supone un verdadero reto, habida cuenta de que en el ALBA funcionan más de 7000 equipos conectados por más de 20.000 clases de cables extendidos a lo largo de más de 250 kilómetros.

FUENTE DE CIENCIA

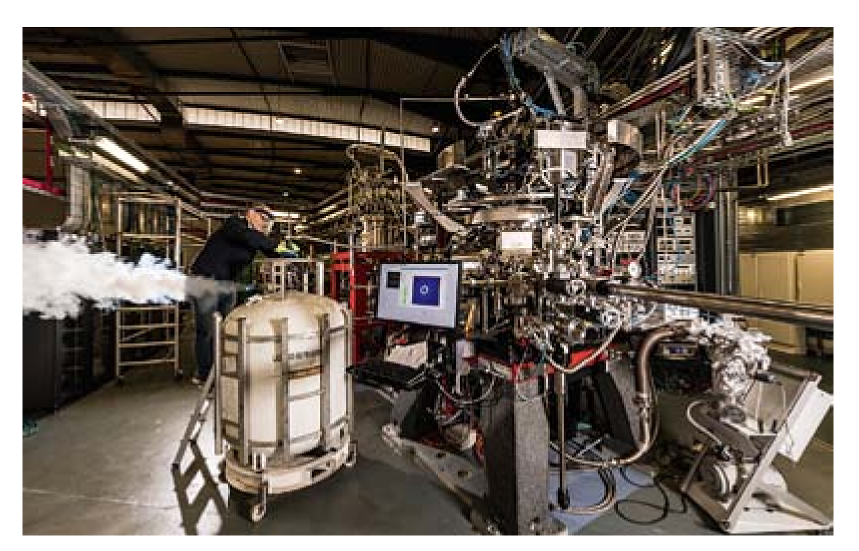
Las capacidades de análisis del ALBA abarcan los campos más punteros de la ciencia, desde el estudio físico y químico de superficies y materiales avanzados, incluidas sus propiedades electrónicas y magnéticas, hasta el análisis de polímeros y materiales de interés biológico. Estas áreas pueden abordarse con distintas técnicas; es decir, con diferentes maneras de aprovechar la interacción entre luz y materia. A grandes rasgos, dichos métodos pueden clasificarse en estudios de dispersión y difracción (determinación de las propiedades estructurales de la materia mediante el análisis de cómo la radiación que incide sobre ella se ve desviada en diferentes ángulos), espectroscopía (estudio de la luz absorbida o emitida por la materia en función de la longitud de onda) y microscopía (examen de la estructura de una muestra mediante la obtención directa de imágenes). Las distintas líneas de luz del ALBA permiten usar múltiples variantes de estas técnicas para resolver un abanico muy amplio de retos científicos.

Los experimentos que se llevan a cabo en el ALBA son seleccionados con criterios de excelencia científica, para lo cual se abren semestralmente convocatorias públicas. Las propuestas son revisadas por grupos externos de expertos, quienes las ordenan en virtud de su calidad científica. El ALBA recibe más de 500 solicitudes de uso al año, de las cuales solo puede atender a cerca de la mitad. Un 65 por ciento de ellas corresponden a experimentos liderados por instituciones españolas de casi todas las comunidades autónomas (con un mayor número de Madrid y Cataluña, aunque con una presencia muy relevante de la Comunidad de Valencia, el País Vasco, Aragón y Andalucía). El 35 por ciento restante proceden de más de 40 países, lo que integra plenamente al ALBA en el circuito internacional de usuarios de luz de sincrotrón, en el que los científicos visitan infraestructuras en uno u otro país en función de lo que resulte más adecuado para sus experimentos. En total, el ALBA recibe más de 2000 investigadores cada año. Además, forma parte de la Liga Europea de Fuentes de Fotones Basadas en Aceleradores (LEAPS), la cual preside este año. Este consorcio, formado por otras doce fuentes de luz de sincrotrón y seis láseres de electrones libres de todo el continente, tiene como meta coordinar la política europea de uso y desarrollo de estas infraestructuras.

La experiencia y las capacidades técnicas han ido mejorando con los años. Sin embargo, las facilidades administrativas han sufrido el proceso inverso

Aunque los objetivos principales del ALBA atañen a la ciencia básica, la instalación también ha demostrado su capacidad para llevar la ciencia a la industria. Hasta su puesta en marcha, las empresas españolas no llevaban a cabo investigaciones que requiriesen usar luz de sincrotrón, ya que esta simplemente se encontraba fuera de su alcance. En los últimos años, sin embargo, el ALBA ha albergado experimentos de casi 50 compañías, la mayor parte de ellas españolas. Solo en 2019 visitaron las instalaciones 21 empresas. La mayor parte de ellas provienen del sector farmacéutico, pero también las hay químicas, de materiales avanzados, energía, automoción, medioambiente y cosmética. Además de cubrir los costes marginales por este servicio, las empresas pueden participar en la financiación de los nuevos equipos actualmente en construcción.

Los beneficios industriales del ALBA no se limitan al uso de la luz de sincrotrón. Como es habitual en este tipo de grandes instalaciones científicas, buena parte del equipo necesario para su funcionamiento solo está al alcance de empresas tecnológicas avanzadas. Al suministrar componentes al ALBA, estas compañías adquieren la experiencia y los conocimientos necesarios para dar un salto al



DETALLE de la línea de luz BOREAS del sincrotrón ALBA, un equipamiento único en el mundo dedicado al análisis de las propiedades magnéticas de los materiales.

ALBA

ALBA EN CIFRAS

268 metros
Longitud del anillo de almacenamiento

3 GeV
Energía de los electrones

2000 usuarios
Científicos que utilizan el ALBA cada año

1600 artículos
Producción científica hasta ahora

200.000.000 €
Coste de construcción

25.000.000 €
Coste anual de mantenimiento

mercado global de aceleradores y de técnicas de explotación de la luz de sincrotrón.

FUENTE DE FUTURO

Hoy el ALBA continúa creciendo. Además de mantener y renovar las líneas de luz existentes, se prevé ir aumentando su número. En estos momentos hay cuatro en construcción: NOTOS, que efectuará estudios de difracción y absorción en ciencia de materiales; LOREA, que explotará la técnica de espectroscopia de fotoemisión con resolución angular para el estudio de materiales avanzados, como los superconductores; XAIRA, que dispondrá de un haz de rayos X muy fino y brillante para resolver la estructura de proteínas y complejos biológicos; y FAXTOR, que hará tomografías de rayos X útiles en disciplinas como biología, nutrición y arqueología, entre otras.

En un sentido más amplio, la propia instalación seguirá evolucionando. En estos momentos, la organización está comenzando a preparar una renovación de los aceleradores para dentro de una década. Lo que ya se conoce como el ALBA II muy probablemente consistirá en la sustitución de una gran parte del acelerador para disminuir el tamaño del haz de electrones y aumentar así el brillo del haz de fotones, su coherencia y su capacidad para revelar nuevos detalles de la materia. Y como era previsible, en el entorno del ALBA se irán instalando nuevos laboratorios con tecnologías complementarias, como el próximo laboratorio de microscopía electrónica avanzada.

De cara al futuro, merece la pena volver la vista atrás y reflexionar sobre cómo hemos llegado hasta aquí. Como ocurre con toda gran infraestructura de este tipo, hubo un largo período de gestación (más de diez años) hasta lograr los acuerdos políticos necesarios, unas condiciones financieras adecuadas y un relativo consenso de la comunidad científica e industrial. Hubieron de superarse numerosas dificultades de todo tipo, pero ese tiempo pudo también aprovecharse para la formación de personas y para realizar los primeros diseños y prototipos. No puede decirse que fuera un tiempo perdido.

Una vez aprobado el proyecto, del que no había precedentes en España, hubo que decidir la fórmula jurídica más adecuada para el organismo que debía llevar a cabo la construcción y la gestión de las instalaciones. La fórmula de consorcio, un organismo público que gozaba de la suficiente flexibilidad, se juzgó como la más apropiada.

Las dificultades relativas a la construcción, tanto de la parte civil como de la parte técnica, se superaron gracias a la competencia de los distintos equipos y a la colaboración con otras fuentes de luz de sincrotrón, en cuyo conjunto el proyecto se fue integrando. La experiencia y las capacidades técnicas han ido mejorando con los años. Sin embargo, las facilidades administrativas han sufrido el proceso inverso.

Diez años después de su inauguración y casi ocho después de su apertura para usuarios, el ALBA ha cumplido con creces todas las expectativas. Siendo la instalación científica más compleja del país, es una herramienta extremadamente eficiente y útil para la comunidad científica y tecnológica, y sitúa a España en el club de los países avanzados en el campo de los aceleradores de partículas en general y de la luz de sincrotrón y las fuentes de fotones en particular. Su futuro es muy prometedor, ya que presenta un gran potencial para crecer gracias a la construcción de nuevas líneas de luz y de otros equipos.

España está cada vez más presente en los grandes proyectos científicos globales. Sin embargo, a la vez que debe aumentarse el presupuesto dedicado a la I+D, todavía es necesario un esfuerzo adicional en grandes infraestructuras científicas, aquellas que suponen inversiones superiores a los 50 millones de euros y que ayudan al progreso tecnológico y a la innovación. La concepción, construcción y desarrollo del ALBA constituye un buen ejemplo del camino que debe seguirse. Semejantes inversiones requerirán grandes consensos políticos, una buena planificación y un marco legislativo adecuado. Aunque se trata de cuestiones difíciles de resolver, el resultado es sin duda beneficioso y de gran impacto para el país. IyC

PARA SABER MÁS

La historia del sincrotrón Alba. Ramon Pascual. Universidad Autónoma de Barcelona, 2019.
Liga Europea de Fuentes de Fotones Basadas en Aceleradores (LEAPS): **www.leaps-initiative.eu**
Consorcio para la Construcción, Equipamiento y Explotación del Laboratorio de Luz de Sincrotrón (CELLS): **www.cells.es**

EN NUESTRO ARCHIVO

La luz de sincrotrón. Josep Campmany, Joan Bordas y Ramon Pascual en *IyC*, febrero de 2000.
Rayos X para escudriñar el nanocosmos. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.
El láser de rayos X definitivo. Nora Berrah y Philip H. Bucksbaum en *IyC*, marzo de 2014.
«Diez años de perseverancia hicieron posible el ALBA». Entrevista con Ramon Pascual. Meritxell Farreny Solé, *en este mismo número*.

HISTORIA DE LA CIENCIA

«Diez años de perseverancia hicieron posible el ALBA»

El presidente honorífico del sincrotrón ALBA, Ramon Pascual, desgrana en esta entrevista los factores que marcaron la gestación del proyecto. Política, economía y ciencia se entrelazan en una historia de altibajos que culminó con la construcción de una instalación puntera

Meritxell Farreny Solé

Tras estudiar física en la Universidad de Barcelona y doctorarse en la Universidad de Valencia, en 1967 Ramon Pascual realizó una estancia posdoctoral en el Centro Internacional de Física Teórica de Trieste. Esta ciudad portuaria dibujaba, con París, una línea al suroeste de Europa que delimitaba entonces un área sin ninguna fuente de luz de sincrotrón.

A principios de los años noventa comenzaron algunos esfuerzos para compensar ese déficit y Pascual, que para entonces ya había sido rector de la Universidad Autónoma de Barcelona, no dudó en sumarse a la iniciativa de construir una instalación de este tipo en España. Su paso por el CERN, el Laboratorio de Física Teórica de Orsay y el Laboratorio Rutherford de Oxford le serviría para avanzar, con su equipo, en el diseño del proyecto. En esta entrevista repasa los altibajos del largo camino que esa idea tuvo que recorrer para convertirse en realidad. Ilusión y colaboración, pero también recelos y desconfianzas, éxitos, y también proyectos fallidos, marcaron la gestación del ALBA, que finalmente vio la luz gracias a la perseverancia de sus promotores.

Sr. Pascual, usted viene del campo de la física teórica, no de la experimental. Efectuó el cambio durante su etapa de gestor porque, aunque tenía formación en física de partículas, desconocía el mundo de los aceleradores, ¿no es así?

EN SÍNTESIS

Para superar las carencias en grandes infraestructuras de ciencia y tecnología que sufre España, a comienzos de los años noventa empezó a gestarse la idea de construir una fuente de luz de sincrotrón.

El desarrollo del proyecto tuvo que superar numerosos obstáculos y desconfianzas, provenientes, en parte, de la propia comunidad científica.

Gracias al empeño de sus promotores políticos y científicos, el sincrotrón ALBA es hoy una realidad y se encuentra entre las mejores instalaciones europeas.

ALBA



RAMON PASCUAL DE SANS
Nacido en Barcelona en 1942, estudió física en la Universidad de Barcelona, donde se licenció en 1963. En 1966 obtuvo su doctorado en la Universidad de Valencia. Especializado en mecánica cuántica y teoría de partículas elementales, ha sido catedrático de física en la Universidad de Zaragoza, la Universidad Autónoma de Madrid y la Universidad Autónoma de Barcelona, donde también fue rector de 1986 a 1990. Presidió la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona de 2011 a 2017. Ha recibido diversas condecoraciones, como la medalla Narcís Monturiol en 1991, la Cruz de Sant Jordi en 2011 o la Encomienda de Alfonso X el Sabio en 2016. En la actualidad, continúa vinculado al sincrotrón ALBA (*fondo de la imagen*) en calidad de presidente honorífico, así como al Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de la Universidad Autónoma de Barcelona, de la que es profesor emérito.

En efecto, pertenezco al campo de la física teórica y entonces no entendía mucho acerca de sincrotrones. La primera vez que oí hablar de la luz de sincrotrón fue en una conferencia de Manuel Cardona, el físico catalán más importante, impartida hacia 1968 en la que era entonces mi universidad, la Universidad Complutense de Madrid. Explicó que se estaban estudiando muestras de materia con la luz producida en el Sincrotrón de Electrones Alemán (DESY), en Hamburgo.

¿Cuáles fueron los primeros pasos ante el reto de construir el sincrotrón ALBA?
Lo primero que hicimos fue formar un grupo de trabajo para estudiar la viabilidad de la idea. En él estaban, entre otros, Joan Bordas, por entonces director adjunto del sincrotrón británico de Daresbury, y Salvador Ferrer, jefe de línea del Laboratorio Europeo de Radiación de Sincrotrón (ESRF), en Grenoble. A la luz del estudio, el Gobierno catalán nombró una comisión asesora, presidida por Cardona, que recomendó a Bordas como director. Ahora ya se ha producido el relevo: no estamos ni el director, ni los primeros jefes de división ni yo.

La puesta en marcha del ALBA conllevó un gran trabajo previo de reuniones e informes. ¿Fue difícil establecer relaciones con países que ya tenían experiencia en el sector?
Fueron diez años de trabajo previo con una intensa colaboración internacional. Pero establecer relaciones fue muy fácil porque en la comunidad científica todos nos conocemos, no hay secretos. Tanto Bordas como la comisión asesora lo pusieron fácil.

En el libro* La historia del sincrotrón ALBA*, explica que las primeras etapas del nuevo acelerador coincidieron con la sustitución, en 2006, del sincrotrón LURE (Orsay) por el nuevo SOLEIL (Gif-sur-Yvette) en Francia. ¿Hubo sinergias con este proyecto?
Se establecieron muchas relaciones. Francia contaba con la experiencia previa del LURE, que había quedado anticuado. El nuevo sincrotrón se quería situar fuera de la región de París, y algunas regiones francesas optaron para acogerlo. Entre ellas, Toulouse y Marsella, con las que establecimos contacto. Pero el fuerte centralismo francés y la proximidad del LURE decantaron la construcción a la zona de París. Los suizos también querían construir su propio sincrotrón. Suiza tenía 4 premios nóbel, dos de los cuales estaban a favor, y dos en contra. Nosotros ayudamos al *lobby* «pro-sincrotrón» para convencer a los reticentes.

En el intento de sacar adelante el ALBA, ¿hallaron algún tipo de resistencia?
Algunos políticos estuvieron en contra y algunos incluso nos boicotearon. En Madrid había un personaje que decía que «el sincrotrón catalán había muerto». Diez años de perseverancia hicieron posible el ALBA, un proyecto de luz que algunas personas creían que no vería la luz.

También algunos científicos se opusieron. En la primera reunión con los usuarios españoles de luz de sincrotrón que iban a los centros del extranjero a hacer sus medidas, estos mostraron reticencias. Unos temían que la construcción mermara sus escasos presupuestos de investigación. Otro expuso que cuando necesitaba analizar una muestra iba a un sincrotrón extranjero y hacía su análisis. «¿Qué pasaría si lo hacemos aquí y ese día no funciona?», preguntó. Respondí que «lo mismo que si fuera al del extranjero y el de allí se estropeara ese día. Si el sincrotrón está aquí, se habrá ahorrado el viaje». Muchos daban por hecho que el ALBA no funcionaría, pero ahora se ve que tenemos unos parámetros de rendimiento equiparables a los de los sincrotrones más reconocidos y con mucha más experiencia.

¿Se enmarcaba el proyecto del ALBA en alguna estrategia política a largo plazo?
No. A diferencia de lo que ocurre en Europa o Estados Unidos, donde se planifican mapas de grandes instalaciones a medio y largo plazo, en España no existe ninguna estrategia. El ALBA no responde a ningún tipo de planificación; su curso ha sido azaroso. Si no hubiera sido rector de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) quizás habría sido más difícil promover el proyecto. Tener relaciones personales y contactos facilitó las cosas; de otro modo, no habría podido acceder a personas como el exconsejero Josep Laporte, el expresidente Jordi Pujol, el exministro Alfredo Pérez Rubalcaba, el científico y político Juan Manuel Rojo Alaminos y muchos otros políticos.

En Francia se presentaron varios proyectos. En España, para construir el ALBA, ¿también?
El secretario del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico me convocó a una reunión en Madrid para hablar sobre distintos proyectos de sincrotrones en España, ya que, según él, había proyectos en Madrid, Valencia, el País Vasco y Sevilla. Le comenté que nosotros teníamos un proyecto y un estudio de diseño de 300 páginas (que estaba colgado en la web) para llevarlo a cabo en Cataluña, y que no conocía ningún otro.

Esos otros «proyectos» a los que se hacía referencia, sin embargo, no eran muy maduros.
Es cierto que surgieron otras iniciativas, pero no eran proyectos reales. Nosotros teníamos un proyecto, un equipo de gente trabajando y apoyo político. El expresidente Pujol estaba dispuesto a dar un paso adelante.

Antes de que el ALBA se pusiera en marcha, Fernando Agulló López, profesor de física de la materia condensada en la Universidad Autónoma de Madrid, propuso la adquisición de un acelerador para la investigación en ciencia de materiales. Al no conseguirlo, un profesor de Sevilla propuso instalarlo allí. Sevilla cuenta hoy con un Centro Nacional de Aceleradores. Posteriormente, Agulló tuvo éxito y se construyó otro acelerador en la Universidad Autónoma de Madrid, el Centro de Microanálisis de Materiales. Ambos cuentan con aceleradores adquiridos llaves en mano, no fuentes de luz de sincrotrón.

En el libro menciona también la polémica en torno a la elaboración del proyecto. Algunos eran partidarios de encargarla a una entidad extranjera, pero usted quiso que se llevara a cabo localmente, desde el Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de la UAB. ¿Cómo se resolvió?
La Generalidad de Cataluña creó la comisión asesora externa mencionada antes, formada esencialmente por directores de laboratorios extranjeros, y una comisión promotora formada por políticos. Se produjo una crisis cuando uno de los políticos propuso que la elaboración del proyecto se encargara a un laboratorio estadounidense. Me negué, porque, a mi juicio, debía hacerse desde dentro. Escribí a los miembros de la comisión asesora para conocer su visión y exponer mis argumentos. Finalmente, todas las partes accedieron a hacerlo como yo proponía.

En 1970 había la intención de construir, fuera de Ginebra, el Super Sincrotrón de Protones del CERN, lo que no sucedió. En este caso, usted no intervino en la propuesta de construirlo aquí en España, pero sí lo hizo con la Tau-Charm Factory, para la cual redactó una oferta para instalarla en Cataluña. Para el ALBA, ¿fue útil este antecedente?
Ciertamente presentamos una propuesta, que finalmente derivó en la fuente de luz de sincrotrón ALBA. El estudio que elaboramos para la Tau-Charm Factory [un acelerador de partículas diseñado para medir con gran precisión las características de los leptones tau y las partículas con quark *encanto* (*charm*)] indicaba que tendría un coste más elevado del que se había planificado. En un primer momento, la idea era que la financiación provendría de la Generalidad, del Gobierno español, del CERN y de países terceros. Pero la poca concreción de estos últimos y el sobrecoste condujeron a explorar la posibilidad de sacar adelante una fuente de luz de sincrotrón. Ello fue posible porque los políticos del país ya estaban convencidos de la conveniencia de la Tau-Charm Factory; algunos habían visitado el CERN y otras grandes instalaciones científicas. El proyecto de la Tau-Charm Factory no nos sirvió en el ámbito técnico, pero sí en cuanto a consenso político, que se mantuvo a lo largo de los años. El menor coste de ALBA respecto al presupuestado para la Tau-Charm Factory permitió tomar las decisiones de manera autónoma.

Muchos daban por hecho que el ALBA no funcionaría, pero ahora se ve que tenemos unos parámetros de rendimiento equiparables a los de los sincrotrones más reconocidos

Alrededor de estas grandes infraestructuras también se construyen nuevos centros de investigación. De todas formas, mantiene que alrededor de la UAB y del ALBA hace falta un centro de biología.
Nos hubiera gustado construir un centro de biología estructural porque una parte importante de usuarios del ALBA proviene del campo de la nanociencia y del de la biología estructural. En referencia a la nanociencia, cerca del ALBA se halla el Instituto de Nanociencia y Nanotecnología. En cuanto al centro de biología estructural, como a la UAB le interesaba, planificamos un proyecto que avanzó mucho. Se trataba de un proyecto realmente puntero. Todo iba bien hasta que las exigencias de algunos sectores dispararon el coste. Las dificultades económicas complicaron su evolución y se canceló. Es una iniciativa que debería volverse a impulsar.

Aparte de la colaboración con los centros de investigación, ¿estableció el ALBA relaciones con empresas? ¿Se produjo lo que suele denominarse «fertilización cruzada»?
En general, alrededor de estos grandes laboratorios —cuyo coste tampoco debemos magnificar, porque equivale al del fichaje de un futbolista como Neymar o al de la construcción de equipamientos culturales como el Liceu, y es muy inferior al de un ramal de ferrocarril— se instalan empresas tecnológicas que suelen colaborar con el centro científico. Y aunque el entorno de lo que se conoce como Parque del ALBA se ha visto muy afectado por la crisis económica, el ALBA colabora con varias compañías de la zona.

El ALBA debía contar con cinco líneas de luz, para las que la comunidad científica presentó hasta trece propuestas. Dado su interés, la comisión asesora científica externa consideró que era conveniente construir, además de las cinco previstas, dos líneas de luz adicionales. Las administraciones lo aceptaron ampliando el presupuesto. Un ejemplo de fertilización cruzada lo ofrece la línea MISTRAL, de microscopía de rayos X y de la cual solo hay unas pocas en el mundo. Inicialmente estaba orientada al campo de la biología. Pero después, los físicos la han usado para estudiar el comportamiento de los dominios magnéticos de materiales y el desarrollo de materiales para baterías, uno de los retos a los que se enfrenta nuestra sociedad.

El plan de formación de personal y las primeras becas de 1995 tenían como objetivo que la gente del país pudiera formarse en técnicas de aceleradores. ¿Se ha conseguido?
Sí, a través de las primeras becas dispusimos de varias personas, que, bajo la dirección de Bordas, contribuyeron al proyecto. Administrativamente, formaban parte del IFAE, que en un principio gestionó el proyecto. Después se constituyó el Consorcio del Laboratorio de Luz de Sincrotrón, que se disolvió cuando se aprobó el ALBA.

Al principio, una tercera parte del personal del ALBA eran extranjeros, otra tercera parte eran españoles «repatriados» y la parte restante personas que ya estaban aquí. Ahora, la proporción extranjera es de un 22 por ciento. El personal español ha ido aprendiendo y algunos saben tanto que los vienen a buscar de fuera. Por ejemplo, el ingeniero que se ocupó de la base de datos de los 18 mil cables del ALBA con una extensión de 300 kilómetros está haciendo algo equivalente en el reactor de fusión ITER y el jefe de ingeniería está trabajando en el CERN. Esta es la marcha usual.

Además, el ALBA contribuye a la formación académica mediante la participación en programas de formación profesional dual, grados, posgrados y posdoctorados.

Este campo evoluciona muy rápido. Al centrarse durante esos años en la gestión, ¿le costó luego reincorporarse a la investigación?
El mundo de los aceleradores está en constante cambio. Es más, si ahora tuviéramos que plantear una nueva propuesta de sincrotrón, no lo haríamos igual porque cada vez hay sistemas más eficientes. Por ejemplo, desde los años setenta hasta la actualidad, la estructura de imanes del sincrotrón de Berkeley ha cambiado tres veces, y el sincrotrón de Suecia (MAXIV), el más moderno de Europa, cuenta con un sistema de imanes muy diferente.

En cuanto a mi situación profesional, en física teórica, si desconectas unos años, quedas desfasado y las matemáticas que usabas antes son ya inservibles. Por tanto, es muy difícil hacer ciencia competitiva. Otro factor es la edad. A lo largo de estos años he aprendido muchas cosas sobre gestión que la juventud desconoce, pero las nuevas generaciones son más rápidas y ágiles en otros aspectos de la investigación.

Volviendo a la evolución del ALBA, y recordando a los usuarios que en un principio desconfiaron del proyecto, ¿se ha ido viendo el sentido y la utilidad del sincrotrón a lo largo de los años?

Antes de disponer del ALBA, el número de científicos españoles que empleaban luz de sincrotrón era muy pequeño porque no tenían otra opción que recurrir a otro país mediante la ayuda de algún convenio o de contactos personales. Al final, como era una vía lenta, en algunas ramas de la ciencia España estaba maniatada porque no tenía manera de acceder a la luz de sincrotrón con facilidad y los investigadores acababan centrándose en otra cosa. La demanda de una fuente de luz de sincrotrón era alta pero insatisfecha. La prueba que lo demuestra es que el ALBA ha ido consolidando una comunidad de usuarios apreciable.

Al comienzo del proyecto había en España 200 usuarios de luz de sincrotrón; el ALBA tiene ahora 2500 usuarios españoles y otros 2000 internacionales, con más de 2000 visitas al año. Por falta de capacidad, el ALBA solo puede atender, en promedio, a la mitad de las peticiones interesantes que solicitan tiempo de haz. En cuanto a las empresas usuarias, antes no había ninguna; ahora tenemos unas 50, muchas de las cuales españolas.

Con el precedente del ALBA, ¿la puesta en marcha de otro sincrotrón en nuestro país sería hoy más ágil?

Si bien el ALBA requiere una ampliación (el año que viene entrarán en funcionamiento dos nuevas líneas de luz y otras dos ya están en construcción), instalar otra fuente de luz de sincrotrón en España no tendría ningún sentido. Lo que sí hace falta son otras infraestructuras de investigación y aquí sí que el ALBA puede servir de precedente. La peculiaridad del ALBA es que lo construimos íntegramente, superando todas las complicaciones, en plazo y en presupuesto. A raíz de esta experiencia, hemos podido asesorar el proyecto de sincrotrón de Irán —con el que tenemos unos acuerdos firmados—, el de México y el de Jordania. Además, el ALBA ha calibrado los imanes de los sincrotrones de Jordania, Canadá y Australia.

¿Con qué otras grandes infraestructuras contamos en España? ¿Cómo se mide su impacto?

España cuenta con cerca de treinta Instalaciones Científico-Técnicas Singulares, aunque pocas son realmente grandes infraestructuras, en el sentido de suponer inversiones del orden de 50 millones de euros o más. Entre estas, además del ALBA, se encuentra el Laboratorio Nacional de Fusión del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, el Gran Telescopio de Canarias, el Centro de Supercomputación de Barcelona y el Centro de Láseres Pulsados de Salamanca.

Para valorar el impacto económico del ALBA, en 2003 encargamos un estudio coste/beneficio a los economistas Josep M. Raya y Ferran Sancho, bajo la dirección de José García Montalvo. Estimando que el ALBA tendría una vida de 25 años y bajo ciertas hipótesis, se demostró su rentabilidad económica. En cuanto al impacto científico, este se ha demostrado, entre otros parámetros, a través de los más de 1600 artículos publicados en revistas especializadas con alto factor de impacto.

¿Qué modificaciones tendrán lugar en el ALBA en los próximos años para que siga actualizado?

Las primeras líneas entraron en funcionamiento en 2012 y la prioridad es mantenerlas en óptimo estado, lo que, en promedio, supone un coste de medio millón de euros para cada una. Por ejemplo, habrá que sustituir el detector de una de las líneas, de un valor considerable, que ya tiene cinco años (la empresa fabricante lo ha descatalogado). Luego hay que construir nuevas líneas y ya hay que planificar lo que será una remodelación del sistema de imanes, lo que se conoce como ALBA II.

¿Cómo evalúa la técnica de láser de electrones libres de rayos X (XFEL), la nueva fuente de rayos X?

Los láseres de electrones libres (FEL) representan otro modo de producir luz en el visible mediante un acelerador lineal y largos sistemas de onduladores. Los XFEL son una técnica complementaria a la de los sincrotrones, pues produce haces de rayos X más coherentes y brillantes, y con una resolución espacial que permite estudiar también fenómenos dinámicos con escalas de tiempo de femtosegundos. Pero el número de estaciones experimentales en un FEL es muy limitado, contrariamente a lo que ocurre en un sincrotrón, donde decenas de experimentos se llevan a cabo simultáneamente. La comunidad de usuarios de esta nueva técnica en España está empezando a crecer. Existen algunos FEL en Europa, América y Asia. De XFEL hay uno en Stanford y, en Europa, en Hamburgo [*véase* «Rayos X para escudriñar el nanocosmos», por Gerhard Samulat; Investigación y Ciencia, junio de 2012].

Para terminar, ¿qué consejos daría a los futuros gestores que proyecten otras instalaciones de la magnitud del sincrotrón ALBA?

No es fácil ni prudente dar consejos. Pero, puestos a ello, yo recomendaría hacer un estudio de viabilidad que precisara los objetivos, lograr un consenso científico y político estable, apuntar a un proyecto de calidad y realizar un análisis coste/beneficio. Además, en el caso español es importante recabar los consejos de los expertos de los países que van por delante de nosotros. Y, una vez aprobado el proyecto, ser riguroso en su desarrollo.

También aconsejaría optar por una fórmula jurídica ágil. La que se ha utilizado para el ALBA, un consorcio, no creo que fuera la adecuada con las actuales regulaciones. Debería crearse un tipo de consorcio de I+D con una normativa específica. IyC

Meritxell Farreny Solé, periodista, está cursando el máster interuniversitario en historia de la ciencia que coordina el Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). (Agradece el asesoramiento proporcionado por Xavier Roqué, profesor de historia de la ciencia de la UAB, durante la elaboración de esta entrevista.)

PARA SABER MÁS

El projecte de font de llum de sincrotró al Vallès. Ramon Pascual de Sans en *Coneixement i Societat*, n.º 1, págs. 80-103, 2003. Disponible en: **https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=942093**
Potenciant la nova economia a Catalunya: Una anàlisi econòmica de la font de llum de sincrotró del Vallès (ALBA). José García Montalvo y Josep M. Raya Vílchez en *Coneixement i Societat*, n.º 9, págs. 32-59, 2005. Disponible en: **http://www.econ.upf.edu/~montalvo/wp/cis09_montalvo.pdf**
Informe del fons històric del Laboratori de Llum de Sincrotró. O. López. Consorci per a la Construcció, Equipament i Explotació del Laboratori de Llum de Sincrotró (CELLS –ALBA), 2008.
La luz de sincrotrón. Sebastián Grinschpun. Edicions UAB, 2016.
La historia del sincrotrón Alba. Ramon Pascual. Edicions UAB, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

ALBA: Luz de sincrotrón para investigar la materia. Caterina Biscari, Gastón García, Ana Belén Martínez y Ramon Pascual, *en este mismo número*.

por Sergio Pérez-Ortega, Alejandro Berlinches de Gea y Laura Force Seguí



Líquenes centinelas

Un proyecto de ciencia ciudadana utiliza los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en nuestras urbes

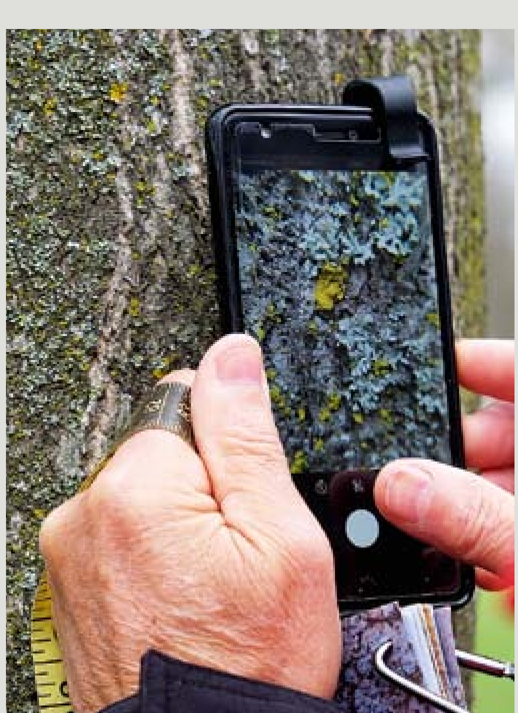
Formados por la simbiosis entre un hongo y al menos otro organismo fotosintético (un alga o una cianobacteria), los líquenes son unos de los organismos más fascinantes. Aunque tienen la capacidad de colonizar ambientes extremos donde muchos otros no logran sobrevivir, como los desiertos cálidos o la Antártida, son muy sensibles a las perturbaciones de su hábitat. En las ciudades, se desarrollan sobre sustratos inertes o cortezas de árboles, con escasos recursos nutritivos. Sin embargo, se muestran especialmente vulnerables a los contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno o el dióxido de azufre, debido a que les cuesta eliminarlos cuando se acumulan en su interior. Como consecuencia, los líquenes de ciudades polucionadas experimentan una disminución de sus poblaciones y de la diversidad de especies.

Esta vulnerabilidad los convierte en unos buenos bioindicadores de la calidad del aire. Durante décadas, los científicos han empleado la correlación negativa entre la diversidad liquénica y la polución atmosférica para realizar un seguimiento de la calidad del aire en ciudades de todo el mundo. En 2018 pusimos en marcha una iniciativa de este tipo en España. Se trata de LiquenCity (liquencity.org), un proyecto de ciencia ciudadana coordinado por el Real Jardín Botánico, el Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, el Instituto de Ciencias del Mar y el Nodo Nacional de Información en Biodiversidad de España.

LiquenCity tiene como objetivo generar mapas de la calidad del aire en Madrid y Barcelona a partir de los datos de líquenes recopilados por los ciudadanos en distintos barrios. El proyecto también busca sensibilizar a la población, en especial de los centros escolares, sobre los efectos de la contaminación en la salud. Las actividades constan de charlas sobre la biología de los líquenes y en ellas se explica el funcionamiento de Natusfera, una plataforma de ciencia ciudadana para registrar y compartir observaciones de la naturaleza y que cuenta con una aplicación para dispositivos móviles a través de la cual se toman datos (https://natusfera.gbif.es).

Gracias a la participación ciudadana, desde el 16 de octubre de 2018 se han superado las 5000 observaciones y se han identificado unas 30 especies. En los próximos meses se publicarán los primeros mapas de abundancia y diversidad de líquenes de Madrid y Barcelona. Los primeros análisis confirman que estos valores resultan más bajos en el centro de la ciudad, aunque con algunas excepciones, debido, supuestamente, a la irregular circulación del aire. En una ampliación del proyecto, acabamos de poner en marcha LiquenCity 2 para abarcar otras ciudades, en concreto, Oviedo, Pamplona y Pontevedra.

—Sergio Pérez-Ortega
y Alejandro Berlinches de Gea
Real Jardín Botánico (Madrid)
—Laura Force Seguí
Centro de Investigación Ecológica
y Aplicaciones Forestales (Barcelona)



EL MÓVIL, al que puede acoplarse una lupa para obtener imágenes más detalladas de los líquenes, es la herramienta de trabajo básica en el proyecto LiquenCity.



KATIA CEZÓN (*móvil*); ANTONIO GÓMEZ BOLEA (1 y 2); SERGIO PÉREZ ORTEGA (3 y 4)





1 2

3 4





LOS LÍQUENES pueden presentar morfologías y colores muy variados, como los de *Teloschistes chrysophthalmos* (1) y *Ramalina farinacea* (2), observados en Barcelona. Algunos soportan altos niveles de contaminación, como *Phaeophyscia orbicularis* (gris) y *Candelaria pacifica* (amarillo) (3), registrados en Madrid, mientras que otros son muy vulnerables a ella, como *Evernia prunastri* (4), fotografiado en la Casa de Campo de esa ciudad.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

por Aitor Anduaga Egaña



Aitor Anduaga Egaña es profesor-investigador Ikerbasque en el Museo Vasco de Historia de la Medicina y de la Ciencia de la Universidad del País Vasco.

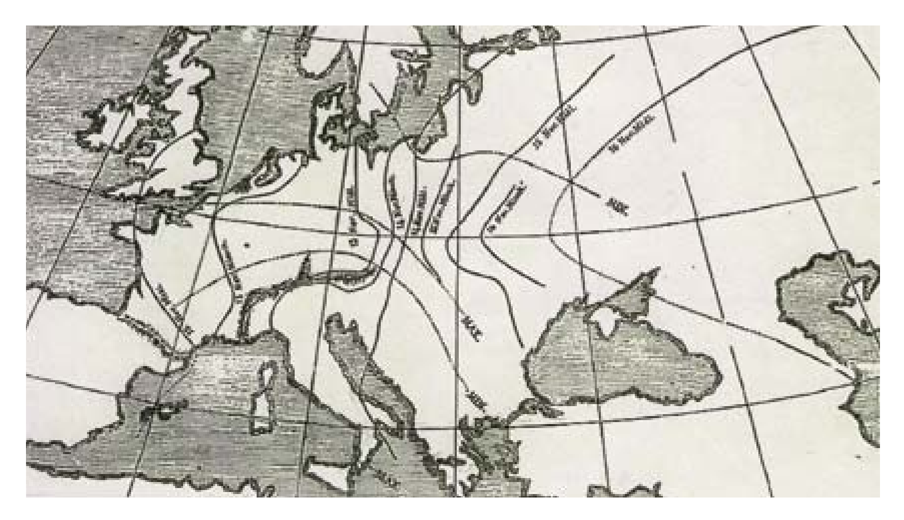
La domesticación del tiempo

La predicción meteorológica fue modelada, a la vez que limitada, por la estadística y la construcción de las naciones-estado

La predicción del tiempo es la práctica más conocida de la meteorología. Cuando pensamos en ella, imaginamos mapas de tiempo con frentes, depresiones y anticiclones; y vemos isobaras que unen lugares con la misma presión atmosférica. Es más, damos por sentado que estos rasgos son la forma normal de visualizar los cambios del tiempo. Pero la elección de este tipo de representación es el resultado de desarrollos relativamente recientes. De hecho, fue en la segunda mitad del siglo XIX, momento en que se fueron construyendo las naciones-estado y el centralismo se impuso en Europa y América, cuando la cartografía del tiempo pasó a ser una práctica aceptada y legitimada por meteorólogos y gobernantes por igual.

En efecto, de 1855 a 1865, físicos como Urbain Le Verrier, del Observatorio de París, su asistente Hippolyte Marié-Davy y el jesuita Angelo Secchi, del Observatorio del Colegio Romano, propusieron que el avance de las áreas de baja presión podía predecirse mediante mapas de isobaras. A estas áreas las llamaron *depresiones*. Sentaban así las bases de una práctica —que era un arte más que una ciencia— que perduró hasta los años veinte del siglo pasado.

Meteorólogos de diferentes servicios nacionales adoptaron el método. Y no solo eso. También compartieron dos principios básicos: primero, que el comportamiento del tiempo venía determinado, en gran medida, por la distribución de la presión atmosférica; segundo, que el tiempo «viajaba» a través de los mapas sinópticos. Así, las «bajas» eran las portadoras del mal tiempo, mientras que las «altas» anunciaban bonanza. Las isolíneas tenían el poder de crear cosas «trazables y rastreables», entidades que adquirían el estatus de realidades objetivas. Los mapas isobáricos ganaban, de este modo, la legitimidad científica de los servicios gubernamentales, y lograban así aceptación entre el público general.



PASO DE LA TORMENTA DEL MAR NEGRO a través de Europa del 12 al 16 de noviembre de 1854, según el mapa elaborado por Emmanuel Liais y presentado por Urbain Le Verrier en la sesión del 31 de diciembre de 1855 en la Academia de Ciencias de París.

FUENTE: *L'ESPACE CÉLESTE, OU DESCRIPTION DE L'UNIVERS, SUIVI DE RÉCITS DE VOYAGES ENTREPRIS POUR EN COMPLÉTER L'ÉTUDE*, 2.ª ED. EMMANUEL-BERNARDIN LIAIS, GARNIER FRÈRES, PARÍS, 1881.

Sin embargo, medio siglo después, esos dos principios comenzaron a desmoronarse. Un grupo de la escuela de meteorología de Bergen revolucionó el campo de la predicción, introduciendo los conceptos de masa de aire y frente, y dibujando frentes (franjas de transición entre dos masas de aire) en los mapas. Vilhelm Bjerknes, líder de esta escuela, describía así las limitaciones de sus predecesores: «Durante cincuenta años, los meteorólogos de todo el mundo miraron a los mapas del tiempo sin descubrir sus causas más importantes. Yo solo di el tipo apropiado de mapas a los jóvenes científicos apropiados» (esto es, a los físico-matemáticos con inquietudes meteorológicas). Y así lo veía un colega suyo, Richard Reed, en 1977: «Los principios físicos y los conceptos teóricos desempeñaron un papel pequeño, si no nulo, en la predicción práctica del tiempo hasta la Primera Guerra Mundial».

¿Por qué se había adoptado, pues, aquel método predictivo? ¿Cómo es que se aceptaron, casi universalmente, unos principios que luego iban a ser rechazados por erróneos, infundados y físicamente absurdos?

El argumento más común esgrimido por historiadores y científicos es que en el siglo XIX la predicción del tiempo era demasiado empírica. Como se basaba en técnicas de extrapolación, reglas empíricas e intuiciones, han tendido a pensar que no era suficientemente científica. Pero ello no explica que fuera aceptada de forma casi universal.

Afortunadamente, algunos historiadores de la ciencia han comenzado a arrojar luz sobre el desarrollo de las técnicas sinópticas predictivas. Fabien Locher lo atribuye a la emergencia de «una cierta cultura material e intelectual de meteorología dinámica desde los años 1850». Según Locher, esta cultura fue inspirada

por las innovaciones que introdujo Le Verrier en el Observatorio de París (aparatos electromecánicos y una división del trabajo propiciada por la industrialización).

Ahora bien, aunque esas innovaciones a buen seguro impulsaron la producción de mapas, la tesis de que hubo una cultura material e intelectual es falsa. En los años 1850 y 1860, el rasgo que definió a la meteorología fue la confrontación de dos concepciones rivales de cómo debía estudiarse el movimiento del aire. Una, el enfoque euleriano, se basaba en la representación sinóptica de isobaras y el papel principal de la distribución horizontal de la presión atmosférica. La otra, el enfoque lagrangiano, ponía de relieve las trayectorias de aire y líneas de corriente, al tiempo que recelaba de las representaciones en términos únicamente isobáricos. En esta confrontación, el enfoque euleriano triunfó sobre el lagrangiano. ¿Por qué?

Del mundo científico al social

La predicción del tiempo trata de movimientos de aire, es decir, de dinámica de fluidos. Básicamente, hay dos maneras de describir fluidos. En el enfoque euleriano, las propiedades de los fluidos se expresan mediante campos; el observador está interesado en la presión, velocidad, etcétera, de un fluido en un lugar dado, más que en la velocidad o posición de una partícula individual. Este enfoque produce isobaras y líneas de corriente de viento que se representan en mapas. En cambio, en el enfoque lagrangiano se siguen partículas individuales, al igual que se siguen las bolas de billar en un experimento físico. Aquí, el observador está interesado en parcelas de aire individuales, y en sus posiciones y velocidades a través del tiempo. En lugar de mapas, este enfoque produce análisis de trayectorias.

Sin embargo, sería engañoso pensar que esos dos enfoques se refieren solo a cómo aplicar las ecuaciones de Euler o Lagrange al movimiento del aire, como se enseña en los libros de texto de mecánica de fluidos. Tratan, además, de marcos de referencia observacionales y organizativos. La visión euleriana mira el movimiento del fluido desde puntos de observación fijos: las estaciones meteorológicas terrestres (como cuando nos sentamos en la orilla de un río y vemos pasar el agua). La visión lagrangiana, en cambio, observa desde un punto móvil la trayectoria de la parcela de aire (como cuando nos sentamos en una barca y nos movemos río abajo). Aquí, los sistemas de observación incluyen cometas, globos aerostáticos equipados con instrumentos registradores, etcétera.

Veamos ahora por qué esos dos enfoques son especialmente influenciables por factores sociales. Por definición, en el enfoque euleriano cada campo necesita expresarse como una función del espacio y del tiempo; de ahí, pues, el uso de coordenadas espaciales fijas (las estaciones terrestres) y observaciones rutinarias de superficie. Estas características hacen que el método euleriano sea especialmente apropiado para sistemas de observación centralizados y sumamente estandarizados, sobre todo cuando se quiere estudiar estructuras espacialmente coherentes, como los ciclones. Por el contrario, en el enfoque lagrangiano los campos se expresan como una función del tiempo, no del espacio. Este enfoque denota, por tanto, libertad y sistemas de observación autónomos.

Todo indica que nos encontramos ante un aspecto que ha pasado desapercibido en la historiografía y sociología de la ciencia: la dimensión social de los enfoques euleriano y lagrangiano. Esto es, mientras el uso del método lagrangiano entraña verticalidad e inmanejabilidad, el del euleriano lleva consigo territorialidad y horizontalidad. Ello nos permite estudiar interesantes transiciones entre el mundo científico y el mundo social.

Pensamiento científico al servicio del Estado

En noviembre de 1854, una tempestad (conocida como la gran tormenta del Mar Negro) destruyó parte de la flota aliada en la Guerra de Crimea. Las flotas francesa y británica luchaban contra las fuerzas rusas. La gran tormenta no solo desató una crisis en la seguridad marítima y militar, sino que abrió una ventana de oportunidad a Le Verrier. El contexto es importante: Francia acababa de salir de las revoluciones sociales que sacudieron Europa en 1848, y el nuevo emperador, Napoleón III, quería recuperar el liderazgo mundial, implementando orden, control y un Estado sumamente centralizado. Los objetivos de Napoleón estaban en consonancia con los fines de Le Verrier. Este tenía planes para reorganizar el Observatorio de París en 1855 mediante un ambicioso sistema internacional para avisos de tormenta, con París como el centro de control.

Para implementar su plan, Le Verrier necesitaba la aprobación de los miembros de la Academia de Ciencias de París. En una sesión celebrada en 1855, quiso convencerles de que era factible seguir la trayectoria de las tormentas a tiempo real. Para ello, les mostró un mapa que había preparado su asistente Emmanuel Liais, a partir de técnicas cartográficas desarrolladas por Adolphe Quetelet unos años antes. Según este, la tormenta se propagaba a través de ondas atmosféricas, como lo hacen las olas marinas. Todo indica que Le Verrier abrazó intencionadamente el método gráfico de Quetelet para lograr que los académicos respaldaran su plan. Dicho de otra manera, Le Verrier adoptó esa técnica, no porque fuese sugerido por alguna teoría mecánica o hidrodinámica, sino porque acomodó el pensamiento científico a los intereses de Estado.

Luego, volviendo a la pregunta de por qué se adoptó y triunfó el enfoque euleriano, vemos que las razones responden más a fines y necesidades prácticas que a principios físicos. De hecho, los científicos fueron impelidos por el oportunismo político y por necesidades de seguridad marítima y militar. Para Le Verrier y sus asistentes, el enfoque euleriano se convirtió en una herramienta efectiva para lograr objetivos tales como orden, control y centralización en la organización de las actividades científicas. Era, además, de más fácil manejo matemático y gráfico que el enfoque lagrangiano. En suma, era un medio para alcanzar fines tanto científicos como sociopolíticos.

Si la seguridad y la vigilancia son dos de los distintivos de los Estados modernos, entonces la producción de mapas de tiempo debe verse como uno de los hechos fundamentales en la construcción de los estados-nación. IyC

PARA SABER MÁS

Air apparent. How meteorologists learned to map, predict, and dramatize weather. Mark Monmonier. The University of Chicago Press, Chicago, 1999.

Predicting the weather: Victorians and the science of meteorology. Katharine Anderson. The University of Chicago Press, Chicago, 2005.

Le savant et la tempête. Étudier l'atmosphère et prévoir le temps au XIX siècle. Fabien Locher. Presses Universitaires de Rennes, Rennes, 2008.

Cyclones and earthquakes. The jesuits, prediction, trade, and Spanish dominion in Cuba and the Philippines, 1850–1898. Aitor Anduaga. Ateneo de Manila University Press, Quezon City, 2017.

Politics, statistics and weather forecasting, 1840–1910. Taming the weather. Aitor Anduaga. Routledge Press, New York, 2019.

por Emilio Vargas Castrillón



Emilio Vargas Castrillón es coordinador de la Plataforma Española de Unidades de Investigación Clínica y Ensayos Clínicos (SCReN), jefe del Servicio de Farmacología Clínica del Hospital Clínico San Carlos y catedrático del Departamento de Farmacología y Toxicología de la Universidad Complutense de Madrid.

¿Cómo puede accederse a las terapias más novedosas?

Los fármacos experimentales no siempre están al alcance de quien podría beneficiarse de ellos. Algunas estrategias intentan allanar el camino

Para que un medicamento llegue a comercializarse, antes debe someterse a diversas pruebas que culminan con el estudio de su eficacia y seguridad en las personas, lo que se conoce como ensayos clínicos. Una vez superados estos, la autorización del fármaco la decidirán las agencias reguladoras: en España, la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) y, en Europa, la Agencia Europea de Medicamentos. En su mayor parte, los ensayos clínicos se llevan a cabo en la población a la que se prevé dirigir el tratamiento. Pero ¿puede cualquier paciente que lo desee recibir un fármaco que no esté aprobado?

En primer lugar, tiene la posibilidad de participar en los ensayos (aunque deberá tener en cuenta que quizá le toque formar parte del grupo de control, que no recibirá el tratamiento experimental). No obstante, la incorporación a estos estudios puede resultar difícil, ya que se realizan en centros seleccionados. Los médicos suelen ser quienes indagan sobre los ensayos que encajan con las características de sus pacientes y quienes les comunican a estos tal información. Como es lógico, los médicos que formen parte del equipo investigador estarán más familiarizados con la terapia experimental y presumiblemente invitarán a participar a un mayor número de sus pacientes. Ello favorece a la población atendida en las grandes ciudades y los centros sanitarios donde se desarrollan más ensayos. En las zonas rurales, los médicos deben considerar factores añadidos, como la carga que le supondrían a un enfermo los desplazamientos frecuentes, lo cual disminuye las opciones de la población de la España vacía a las terapias novedosas.

Los pacientes pueden acudir a otras fuentes de información, aparte de los médicos, para conocer los tratamientos que se están investigando: las bases de datos de los ensayos clínicos. Cabe destacar el Registro Español de estudios clínicos (reec.aemps.es), diseñado para que resulte comprensible para la población general; el Registro Europeo de Ensayos Clínicos (clinicaltrialsregister.eu), en inglés y de lenguaje algo más técnico; y el ClinicalTrials.gov, que incluye los ensayos realizados en 209 países de todo el mundo.



Aun así, querer no es poder, de cara a integrarse en un ensayo. Los participantes deben cumplir una serie de criterios, generalmente exigentes, con el fin de que la población estudiada sea homogénea y evitar así sesgos en los resultados. Por esta razón, se tenderá a relegar a pacientes con varias alteraciones concomitantes.

Sin embargo, en nuestro entorno existe otra vía para acceder a un tratamiento experimental: el uso compasivo de medicamentos. Está dirigido a los pacientes que no pueden participar en un ensayo, no responden a los tratamientos autorizados y sufren una enfermedad crónica, gravemente debilitante o que pone en peligro su vida. El uso compasivo requiere el consentimiento del paciente, la conformidad de la dirección de su centro asistencial y la autorización del fabricante del medicamento y de la AEMPS. El proceso de tramitación administrativa lleva cierto tiempo, por lo que el médico prescriptor deberá realizar la solicitud con antelación suficiente. Es importante discernir que mientras el propósito de los ensayos es obtener información sobre el medicamento, el uso compasivo nace con el objetivo de resolver una necesidad médica no cubierta y ofrecer una oportunidad a los pacientes que carecen de alternativas.

Las dos vías descritas permiten acceder a los medicamentos más novedosos. En este sentido, debemos resaltar la posibilidad que ofrece el sistema sanitario de nuestro país para beneficiarse de ellos.

La AEMPS autoriza cada año más de 33.000 solicitudes de uso compasivo de medicamentos y más de 800 ensayos clínicos, unas cifras importantes en términos absolutos pero que empequeñecen si las comparamos con los 46 millones de personas que cuentan con asistencia sanitaria o los 81 millones de consultas hospitalarias anuales que se realizan en nuestro sistema de salud. No disponemos de estudios que nos permitan determinar si existen pacientes que podrían beneficiarse de estos medicamentos y no lo hacen. Las estrategias que están siguiendo algunas comunidades autónomas de registrar los enfermos interesados en participar en ensayos clínicos pueden ser una buena alternativa para facilitar su acceso a los tratamientos experimentales. Con ello se consigue también un mayor número de participantes y, por tanto, una mayor solidez de los estudios que investigan los nuevos medicamentos.

KOTRYNA ZUKAUSKAITE

NEUROCIENCIA

¿Llegarán a ser conscientes las máquinas?

En menos de una generación, los ordenadores podrían alcanzar un nivel de inteligencia próximo al humano. Pero ¿serán capaces de experimentar el mundo como lo hacemos nosotros?

Christof Koch

Ya se vislumbra un futuro en el que la capacidad intelectual de los ordenadores se acercará a la nuestra. Sentimos en la nuca la respiración de algoritmos de aprendizaje automático cada vez más potentes. Los rápidos avances de las próximas décadas traerán máquinas con un nivel de inteligencia humano, capaces de hablar y razonar, lo que tendrá innumerables repercusiones económicas, políticas e, inevitablemente, militares. El nacimiento de la verdadera inteligencia artificial (IA) afectará en gran medida al porvenir de la humanidad.

Las siguientes citas proporcionan un buen ejemplo:

«Desde el momento en que se produjo el último gran avance en inteligencia artificial a finales de la década de 1940, científicos de todo el mundo han buscado formas de aprovechar esta "inteligencia artificial" para mejorar la tecnología más allá de lo que pueden lograr los programas de inteligencia artificial más potentes de hoy en día.»

«Aún se llevan a cabo investigaciones para entender mejor lo que serán capaces de hacer los nuevos programas de IA sin rebasar las fronteras actuales de la inteligencia. Por el momento, la mayoría de los programas de IA se han limitado principalmente a tomar decisiones simples o a realizar operaciones sencillas con cantidades de datos relativamente pequeñas.»

Estos dos párrafos los escribió GPT-2, un algoritmo de aprendizaje automático desarrollado por OpenAI (un instituto que promueve la IA beneficiosa para la humanidad) con un cometido que puede parecer estúpido: predecir la siguiente palabra de un texto arbitrario. La red no está preparada para «comprender» la prosa en un sentido humano. En cambio, durante la fase de entrenamiento, ajusta las conexiones internas de sus redes neuronales simuladas para prever mejor la siguiente palabra, luego la que sigue a esta, y así sucesivamente. Entrenada con ocho millones de páginas web, posee más de mil millones de conexiones que emulan las sinapsis. Al introducir las primeras frases del presente artículo, el algoritmo generó dos párrafos que parecen redactados por un alumno que trata de recordar los puntos clave de una clase introductoria sobre aprendizaje automático. El resultado contiene palabras y frases correctas: ¡en realidad no está nada mal! Si volvemos a presentarle el mismo texto, el algoritmo produce una versión distinta.

Los descendientes de estos *bots* desatarán una oleada de falsificaciones profundas (*deepfakes*), bulos y reseñas falsas de productos que se sumarán al miasma de Internet. Serán un nuevo ejemplo de programas que hacen cosas que solíamos considerar exclusivamente humanas: jugar a juegos de estrategia en tiempo real, traducir textos, ofrecer recomendaciones personalizadas de libros y películas o reconocer personas en fotos y vídeos.

Aún falta mucho para que un algoritmo de aprendizaje automático consiga escribir una obra maestra como *En busca del tiempo perdido*, de Marcel Proust, pero todo apunta en esa direc-

GÉRARD DUBOIS



EN SÍNTESIS

Las máquinas con un nivel de inteligencia humano se vislumbran ya en el horizonte. Aún se mantiene la incógnita de si podrán llegar a ser conscientes, lo cual tendría importantes implicaciones éticas.

De acuerdo con la teoría del espacio de trabajo neuronal global, una simulación suficientemente fiel de un cerebro podría generar consciencia. La verdadera inteligencia artificial sería sensible.

En cambio, la teoría de la información integrada postula que la consciencia surge a partir de los poderes causales del cerebro. Estos no pueden simularse, así que los ordenadores nunca dejarían de ser meras máquinas.

ción. Recordemos cuán torpes y toscos resultaban los primeros intentos de las máquinas por jugar a juegos, traducir textos o recrear el habla. Pero gracias a la llegada de las redes neuronales profundas y a la enorme infraestructura computacional de la industria tecnológica, los ordenadores mejoraron inexorablemente hasta que los resultados dejaron de parecer irrisorios. Como se ha visto en juegos como el go, el ajedrez y el póquer, los algoritmos de hoy en día pueden superar a los seres humanos y, cuando eso ocurre, las risas dan paso a la consternación. ¿Somos incapaces de controlar a los espíritus útiles que hemos invocado, como el aprendiz de brujo de Goethe?

¿CONSCIENCIA ARTIFICIAL?

Aunque los expertos discrepan sobre qué constituye la inteligencia (natural o no), la mayoría acepta que los ordenadores alcanzarán tarde o temprano lo que en la jerga se denomina «inteligencia general artificial» (IGA). Pero poner el foco sobre la inteligencia de las máquinas nos impide ver otros interrogantes: ¿se sentirá algo al ser una IGA? ¿Pueden los ordenadores llegar a ser conscientes?

Al hablar de «consciencia» o «percepción subjetiva», me refiero a la cualidad inherente a cualquier experiencia, como el delicioso sabor de la Nutella, el agudo dolor que causa un diente infectado, el lento paso del tiempo cuando uno se aburre o la vitalidad y ansiedad que preceden al comienzo de una competición. Parafraseando al filósofo Thomas Nagel, podríamos decir que un sistema es consciente si siente algo al ser ese sistema.

Pensemos en la embarazosa sensación de percatarnos de que acabamos de meter la pata, de que lo que pretendía ser una broma ha sonado a insulto. ¿Lograrán los ordenadores experimentar una agitación semejante? Y cuando, tras aguardar media hora al teléfono, una voz sintética profiere un «lamentamos haberle hecho esperar», ¿de veras se siente mal el programa por habernos mantenido en el limbo del servicio de atención al cliente?

No cabe duda de que nuestra inteligencia y nuestras experiencias son consecuencia ineludible de los poderes causales naturales del cerebro y no de ningún poder sobrenatural. Esta premisa le ha resultado muy útil a la ciencia a lo largo de los últimos siglos, mientras explorábamos el mundo. El cerebro humano es sin duda el pedazo de materia activa organizada más complejo que existe en el universo conocido. Pero ha de obedecer las mismas leyes físicas que los perros, los árboles y las estrellas. Nada tiene carta blanca. Aún no comprendemos por completo los poderes causales del cerebro, pero los experimentamos a diario: un grupo de neuronas se activa cuando percibimos colores, mientras que las células que se disparan en otro vecindario cortical se asocian a un estado de ánimo jovial. Cuando los electrodos de un cirujano estimulan estas neuronas, el sujeto ve colores o estalla en carcajadas. Y a la inversa: la anestesia apaga el cerebro y suprime esas experiencias.

Dados estos supuestos básicos y ampliamente aceptados, ¿qué implicará la evolución de la verdadera inteligencia artificial respecto a la posibilidad de una consciencia artificial? Al contemplar esta cuestión, es inevitable llegar a una bifurcación que conduce a dos destinos esencialmente distintos. El espíritu de nuestra época, encarnado en novelas y películas como *Blade runner*, *Her* y *Ex machina*, se encamina con decisión hacia el supuesto de que las máquinas verdaderamente inteligentes serán sensibles: hablarán, razonarán, ejercerán la autoobservación y la introspección. Y eso las hará conscientes.

Esta vía es la que adopta una de las principales teorías científicas de la consciencia: la del espacio de trabajo neuronal global (EtNG). Esta teoría toma el cerebro como punto de partida e infiere que son algunas de sus peculiares características arquitectónicas las que dan lugar a la consciencia.



Christof Koch es presidente y director científico del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle, y forma parte del consejo de asesores de *Scientific American*.

Sus orígenes se remontan a la «arquitectura de pizarra» propia de la computación de los años 70, en la que los programas especializados accedían a un repositorio común de información, denominado pizarra o espacio de trabajo central. Los psicólogos postularon que el cerebro posee un recurso de procesamiento análogo, que resulta crucial para la cognición humana. Su capacidad es reducida: en un momento dado, hay una única percepción, pensamiento o recuerdo ocupando el espacio de trabajo. La nueva información compite con la antigua y la reemplaza.

El neurocientífico cognitivo Stanislas Dehaene y el biólogo molecular Jean-Pierre Changeux, ambos del Colegio de Francia, aplicaron estas ideas a la arquitectura de la corteza cerebral, la capa más externa de la sustancia gris. Postularon que el espacio de trabajo se plasma en una red de neuronas piramidales (excitadoras) vinculadas a regiones corticales distantes, en concreto a las áreas asociativas prefrontal, parietotemporal y medial (cingulada).

Buena parte de la actividad cerebral se mantiene localizada y es, por lo tanto, inconsciente; por ejemplo, la del módulo que controla hacia dónde miran los ojos (algo a lo que permanecemos casi completamente ajenos) o la del módulo que ajusta la postura del cuerpo. Pero cuando la actividad en una o más regiones supera cierto umbral (al ver la imagen de un tarro de Nutella, pongamos por caso) se produce una ignición, una onda de excitación neuronal que se extiende a través del espacio de trabajo por todo el cerebro. De esta forma, la señal queda a disposición de una serie de procesos secundarios como el lenguaje, la planificación, los circuitos de recompensa, el acceso a la memoria a largo plazo y el almacenamiento en la memoria a corto plazo. El acto de difundir globalmente la información es lo que hace que seamos conscientes de ella. La inimitable experiencia de la Nutella se basa en las neuronas piramidales que contactan con la región de planificación motora del cerebro y dan la orden de coger una cucharada de crema de avellanas. Entretanto, otros módulos transmiten el mensaje de esperar una recompensa en forma de una descarga de dopamina, causada por el alto contenido en grasas y azúcares de la Nutella.

Los estados conscientes surgen a partir del modo en que el algoritmo del espacio de trabajo procesa las entradas sensoriales, las salidas motoras y las variables internas relacionadas con la memoria, la motivación y las expectativas. Así que el procesamiento global es la base de la consciencia. La teoría del EtNG abraza sin reservas el mito contemporáneo del poder casi infinito de la computación. A partir de ahí, solo hace falta una modificación creativa para llegar a la consciencia.

PODER CAUSAL INTRÍNSECO

La ruta alternativa, la teoría de la información integrada (TII), trata de explicar la consciencia desde un punto de vista más fundamental [*véase* «La teoría de la información integrada», por Christof Koch; Mente y Cerebro n.º 73, 2015]. El psiquiatra y neurocientífico de la Universidad de Wisconsin-Madison Giulio Tononi es el principal arquitecto de la TII, a la que han

contribuido otros autores, entre ellos yo mismo. La teoría parte de la experiencia y continúa con la activación de los circuitos sinápticos que determinan la «sensación» que produce esa experiencia. La información integrada es una medida matemática que cuantifica el «poder causal intrínseco» que posee un determinado mecanismo. Las neuronas que generan potenciales de acción que afectan a las células con las que están conectadas (a través de las sinapsis) constituyen un tipo de mecanismo, al igual que los circuitos electrónicos compuestos de transistores, condensadores, resistencias y cables.

El poder causal intrínseco no es una noción ideal y etérea, sino que puede evaluarse con precisión en cualquier sistema: cuanto más se especifiquen en su estado actual la causa (la entrada) y el efecto (la salida) de dicho estado, más poder causal poseerá. La TII estipula que cualquier mecanismo con poder intrínseco (cuyo estado carga con su pasado y contiene la semilla de su futuro) es consciente. Un sistema será más consciente cuanto mayor sea su información integrada, que se representa mediante un número no negativo Φ («fi»). Si carece de poder causal intrínseco, Φ vale cero y el sistema no siente nada.

Dada la heterogeneidad de las neuronas corticales y su conjunto de conexiones de entrada y salida densamente superpuestas, la corteza contiene una enorme cantidad de información integrada. La teoría ha inspirado la construcción de un medidor de consciencia que ya se encuentra en la fase de ensayo clínico: un instrumento para determinar si las personas en estado vegetativo persistente o de mínima consciencia, anestesiadas o con síndrome de enclaustramiento son conscientes aunque sean incapaces de comunicarse [*véase* «¿Es mensurable la consciencia?», por Christof Koch; Investigación y Ciencia, enero de 2018]. Los análisis teóricos de los ordenadores digitales a nivel de sus componentes —los transistores, cables y diodos que sirven de sustrato físico para cualquier cálculo— indican que su poder causal intrínseco y su valor de Φ son mínimos. Además, Φ no depende del programa que se ejecuta en el procesador, ya sirva para calcular impuestos o para simular el cerebro.

De hecho, la teoría demuestra que dos redes que realizan la misma operación de entrada y salida pero difieren en la configuración de sus circuitos pueden presentar distinto valor de Φ: podría ser nulo en uno de los circuitos y elevado en el otro. Aunque desde fuera parezcan idénticas, una red siente algo y la otra no. La diferencia está en el cableado interno de la red. En suma, la consciencia es una cuestión de «ser», no de «hacer».

Así pues, lo que distingue a ambas teorías es que la del EtNG hace hincapié en la función del cerebro humano para explicar la consciencia, mientras que para la TII lo realmente relevante son los poderes causales intrínsecos del cerebro.

Las discrepancias se ponen de manifiesto al inspeccionar el conectoma del cerebro, la especificación completa y precisa de las conexiones sinápticas de todo el sistema nervioso. Los anatomistas ya han cartografiado los conectomas de algunos gusanos. Ahora trabajan en el de la mosca de la fruta y en la próxima década planean abordar el del ratón. Supongamos que en un futuro es posible escanear un cerebro humano (con sus cien mil millones de neuronas y mil billones de sinapsis) a nivel ultraestructural tras la muerte de su dueño, y luego simular el órgano en un ordenador avanzado, quizás una máquina cuántica. Si el modelo es lo bastante fiel, la simulación se despertará y se comportará como una imitación digital de la persona fallecida: hablará y accederá a sus recuerdos, deseos o miedos.

Si todo lo que se necesita para crear la consciencia es imitar la funcionalidad del cerebro, como postula la teoría del EtNG, la persona simulada será consciente, reencarnada dentro de un ordenador. De hecho, subir el conectoma a la nube para que la gente pueda vivir en el más allá digital constituye un tema recurrente en la ciencia ficción.

La TII ofrece una interpretación radicalmente distinta de esta situación: la imitación no sentirá nada. Actuará como una persona sin ningún sentimiento innato, como un zombi: será la falsificación profunda definitiva.

Para que nazca la consciencia son necesarios los poderes causales intrínsecos del cerebro. Y estos no pueden simularse, sino que deben formar parte de la física del mecanismo subyacente.

A fin de comprender por qué no basta con una simulación, preguntémonos por qué los meteorólogos no se mojan durante la simulación de una tormenta o por qué los astrofísicos pueden simular la inmensa fuerza gravitatoria de un agujero negro sin miedo a ser engullidos por el espaciotiempo deformado en torno a su ordenador. La respuesta: ¡porque una simulación no tiene el poder causal de hacer que el vapor atmosférico se condense en agua o que el espaciotiempo se curve! En principio, sin embargo, sería posible alcanzar un nivel humano de consciencia si vamos más allá de las simulaciones y desarrollamos *hardware* «neuromórfico», basado en una arquitectura construida a imagen y semejanza del sistema nervioso.

Aparte de los debates sobre las simulaciones, existen otras diferencias. La teoría del EtNG y la TII sitúan el sustrato físico de las experiencias conscientes en distintas regiones corticales, con el epicentro en la parte posterior o frontal de la corteza. Esta y otras predicciones se están evaluando en una colaboración a gran escala en la que participan seis laboratorios de EE.UU., Europa y China y que acaba de recibir 5 millones de dólares de la fundación Templeton.

La cuestión de si las máquinas pueden llegar a ser sensibles tiene importantes implicaciones éticas. Si los ordenadores experimentan la vida a través de sus propios sentidos, dejan de ser un simple medio para alcanzar un fin útil para los humanos y se convierten en un fin en sí mismos.

Según la teoría del EtNG, pasan de ser meros objetos a sujetos (cada uno existe como un «yo») con un punto de vista propio. Este dilema se plantea en los episodios más fascinantes de las series de televisión *Black mirror* y *Westworld*. Una vez que las capacidades cognitivas de los ordenadores rivalicen con las de la humanidad, sentirán el deseo irrefrenable de reclamar derechos legales y políticos: el derecho a no ser borrados, a que no limpien sus memorias, a no sufrir dolor ni degradación [*véase* «¿Deberían tener derechos los robots?» por Pablo Jiménez Schlegl; Investigación y Ciencia, agosto de 2019]. La visión alternativa, encarnada por la TII, es que los ordenadores seguirán siendo solo maquinaria tremendamente avanzada, fantasmales cascarones vacíos, desprovistos de lo que más valoramos: el sentimiento de la vida misma. IyC

PARA SABER MÁS

What is consciousness, and could machines have it? Stanislas Dehaene, Hakwan Lau y Sid Kouider, en *Science*, vol. 358, págs. 486-492, octubre de 2017.

The feeling of life itself: Why consciousness is widespread but can't be computed. Christof Koch. MIT Press, 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Es la mente un programa informático? John R. Searle en *IyC*, marzo de 1990.

Consciencia artificial. Christof Koch y Giulio Tononi en *IyC*, agosto de 2011.

¿Qué es la consciencia? Christof Koch en *IyC*, agosto de 2018.

BIOLOGÍA

La célula invulnerable

Los biólogos están construyendo una bacteria inmune a todos los virus del planeta. Lo siguiente podrían ser células humanas inexpugnables

Rowan Jacobsen

Ilustración de Ellen Weinstein



Rowan Jacobsen es periodista y autor de varios libros y artículos sobre geografía, biología y medioambiente.



E L VIRUS SE POSA SOBRE LA CÉLULA COMO UNA ARAÑITA SOBRE UN GLOBO MIL VECES mayor que ella. Tiene seis patas que se despliegan bajo un cuerpo parecido a una jeringa, con una cabeza poliédrica. Se trata del bacteriófago λ y su presa es la bacteria *Escherichia coli*. Ahora que ha encontrado a su víctima, el fago λ hace lo que vienen haciendo incontables billones de virus desde que surgió la vida: se acopla con las patas a la membrana celular, coloca su cuerpo-jeringa sobre un poro y se contrae inyectándole su ADN a la bacteria.

El ADN contiene las pautas para fabricar más virus. De hecho, un virus es poco más que eso: una cápsula de proteínas que encierra las instrucciones para hacer más copias de sí mismo. Los virus no poseen la maquinaria molecular para fabricar piezas nuevas, sino que invaden a las células y usurpan sus mecanismos para multiplicarse hasta que la célula estalla. Pueden hacerlo porque todos los organismos —desde los rinocerontes de la sabana africana hasta los rinovirus responsables de nuestros resfriados— utilizan el mismo sistema de codificación, basado en ácidos nucleicos como el ADN. Basta con introducir el código en la célula para que esta siga las instrucciones y se ponga a fabricar proteínas.

Dentro de la bacteria infectada, comienza el proceso. Las proteínas víricas van cobrando forma y parece que el fago λ se va a salir con la suya. En pocos minutos, la célula está llena de virus nuevos hasta los topes. Cuando salgan, cada uno se dirigirá a otra bacteria, y este ciclo se repetirá una y otra vez.

Pero de repente, la maquinara celular se detiene, incapaz de leer el ADN del virus. En el ancestral duelo entre virus y célula nunca se había producido este fallo. Y ahora el fago λ está condenado a perder.

El motivo de su infortunio es que esta cepa de *E. coli* ha sido reprogramada para utilizar un sistema operativo de ADN que nunca había existido en la Tierra, incompatible con el código del virus. Las diferencias dejan al fago λ indefenso, como si fuera un virus informático para Windows en un ordenador Mac. El mismo destino aguarda a otros atacantes. Los artífices de esta bacteria y su nuevo código creen que será inmune a todos los virus. La han bautizado como *rE.coli-57* y le auguran un futuro muy prometedor.

La cepa *rE.coli-57* se está construyendo en la Escuela de Medicina de Harvard, bajo la dirección de la joven bióloga Nili Ostrov, que lleva cinco años enfrascada en la reconstrucción genética de la bacteria, a la que dedica jornadas extenuantes bajo los fluorescentes del laboratorio. Se trata del proyecto de edición génica más complejo de la historia y se presentó en agosto de 2016 en un trascendental artículo en *Science,* en el que se describen las 148.955 modificaciones del ADN necesarias para que la bacteria sea resistente a los virus. El equipo de Ostrov (que entonces contaba con Marc Güell, actual investigador principal del Grupo de Biología Sintética Traslacional de la Universidad Pompeu Fabra) había realizado ya el 63 por ciento de esos cambios, según aseguraban en el artículo, y la bacteria seguía viva.

Tres años y medio después, la célula reconstruida está casi terminada. Dentro de poco tendrá lugar la escena imaginada en una placa de Petri, y no con un solo virus sino con centenares. Si *rE.coli-57* sobrevive, habrá cambiado para siempre la relación ente los virus y sus presas, entre las que nos incluimos nosotros.

Los virus son increíblemente abundantes: en cada metro cuadrado del planeta se cuentan 800 millones. A nosotros nos causan enfermedades, pero también son una lacra para las empresas que utilizan células en la elaboración de ciertos

EN SÍNTESIS

Además de ser un problema para la salud, los ataques de los virus cuestan miles de millones a la industria farmacéutica (que utiliza bacterias para el desarrollo de medicamentos) y a otros sectores.

Un proyecto de recodificación del ADN de una bacteria se plantea eliminar todos los mecanismos genéticos que la hacen vulnerable a los virus.

La célula rediseñada debería funcionar con normalidad y podría allanar el camino hacia células humanas inmunes a los virus.

productos, desde yogures hasta algunos fármacos. El gigante biotecnológico Genzyme (ahora parte de Sanofi), que emplea células para fabricar moléculas farmacológicas, perdió la mitad de su cotización de mercado cuando en 2009 una infección vírica saboteó su cadena de producción en la planta de Allston (Massachusetts), lo cual comportó una escasez crítica de medicamentos. Los virus también pueden salirles muy caros a las industrias lácteas: como utilizan bacterias para fermentar quesos y yogures, en caso de contaminación estos productos deben ser desechados. Por eso, una bacteria a prueba de virus podría valer miles de millones.

Una célula invulnerable a los virus abriría las puertas a todo un arsenal de fármacos de diseño. «Si queremos fabricar anticuerpos y proteínas complejas, tenemos que incorporarles propiedades químicas distintas», explica Ostrov. «Sería un cambio radical para la industria farmacéutica.» Todas las proteínas naturales están compuestas por los mismos 20 aminoácidos, pero gracias a su novedoso sistema operativo, *rE.coli-57* podría sintetizar proteínas diferentes con aminoácidos exóticos, al igual que podemos montar juguetes distintos si añadimos piezas nuevas al juego básico de un Lego. Las proteínas de diseño podrían actuar sobre enfermedades como el sida o el cáncer con una precisión exquisita.

Más polémica es la idea de que *rE.coli-57* pueda servir, a la larga, para obtener células humanas a prueba de virus, con un ADN inexpugnable. Ese logro sería valiosísimo para la investigación médica, ya que los virus también infectan a las células humanas que se cultivan en laboratorio para los ensayos de fármacos. Los más escépticos no creen que las células recodificadas puedan funcionar como las «normales», por lo que no serían adecuadas como medio de experimentación. También se muestran alarmados quienes temen que nos estemos acercando a la creación de seres humanos con ADN a la carta. (Conste que ninguno de los participantes del proyecto propone diseñar personas.) Recodificar una sola célula humana en una placa de laboratorio sería una tarea ímproba, ya que nuestro genoma tiene 3.200 millones de letras, o sea que es 800 veces más largo que el de *E. coli*. Con todo, *rE.coli-57* es un primer paso ineludible y asombroso.

DESCODIFICADORES

La recodificación repele a los virus invasores porque altera el lenguaje que utiliza la célula para fabricar proteínas, que son la sustancia constitutiva de la materia viva. Las proteínas están formadas por unidades más pequeñas, denominadas aminoácidos, cada uno de los cuales se corresponde con un código de tres letras en el ADN, compuesto por distintas combinaciones de las cuatro bases del ADN: A, C, G y T. Por ejemplo, «TGG» significa triptófano y «CAA» significa glutamina. Estos tripletes se llaman codones, y un gen no es más que una secuencia lineal de estos.

La síntesis de proteínas tiene lugar cuando se envía esa secuencia a las fábricas de la célula (los ribosomas), donde los codones se emparejan con moléculas de ARN de transferencia (ARNt). Cada ARNt posee un extremo que se fija a un codón determinado y otro que se une exclusivamente a un tipo de aminoácido. A medida que la secuencia de codones avanza por la línea de montaje, los ARNt van ensartando la cadena de aminoácidos hasta que la proteína está completa.

Este sistema tiene una peculiaridad notoria: las repeticiones. Hay 64 codones porque hay 64 combinaciones de A, C, G y T, pero solo 20 aminoácidos. Eso quiere decir que a la mayoría de los aminoácidos les corresponde más de un triplete codificante en el ADN. Por ejemplo, «AGG» significa arginina, pero «CGA» también. Algunos aminoácidos tienen hasta seis codones.

En el año 2004, George Church, genetista de la Universidad Harvard y jefe de Ostrov, comenzó a plantearse si todos esos codones eran estrictamente necesarios. ¿Qué pasaría si se sustituyesen todos los AGG del genoma de *E. coli* por CGA? Como los dos codifican la arginina, la bacteria fabricaría igualmente todas sus proteínas normales. Ahora bien —y aquí viene algo fundamental—, si también se eliminase de la célula el ARNt que se empareja con AGG, el codón AGG sería un punto muerto en el proceso de síntesis de proteínas.

Mientras pensaba en las consecuencias de eliminar algunos ARNt, Church tuvo una epifanía: «Me di cuenta de que las células se volverían resistentes a todos los virus, lo cual sería una ventaja añadida muy importante». Los virus como el fago λ se reproducen haciendo que la célula lea sus genes y fabrique proteínas a partir de esas secuencias. Pero si se elimina de la célula el ARNt de AGG, todos los genes del virus que contengan el codón AGG se quedarán atascados a la espera de un ARNt que ya no existe, de modo que la proteína vírica no terminará de ensamblarse.

Una célula recodificada podría abrir las puertas a todo un arsenal de fármacos de diseño. «Sería un cambio radical», asegura Ostrov

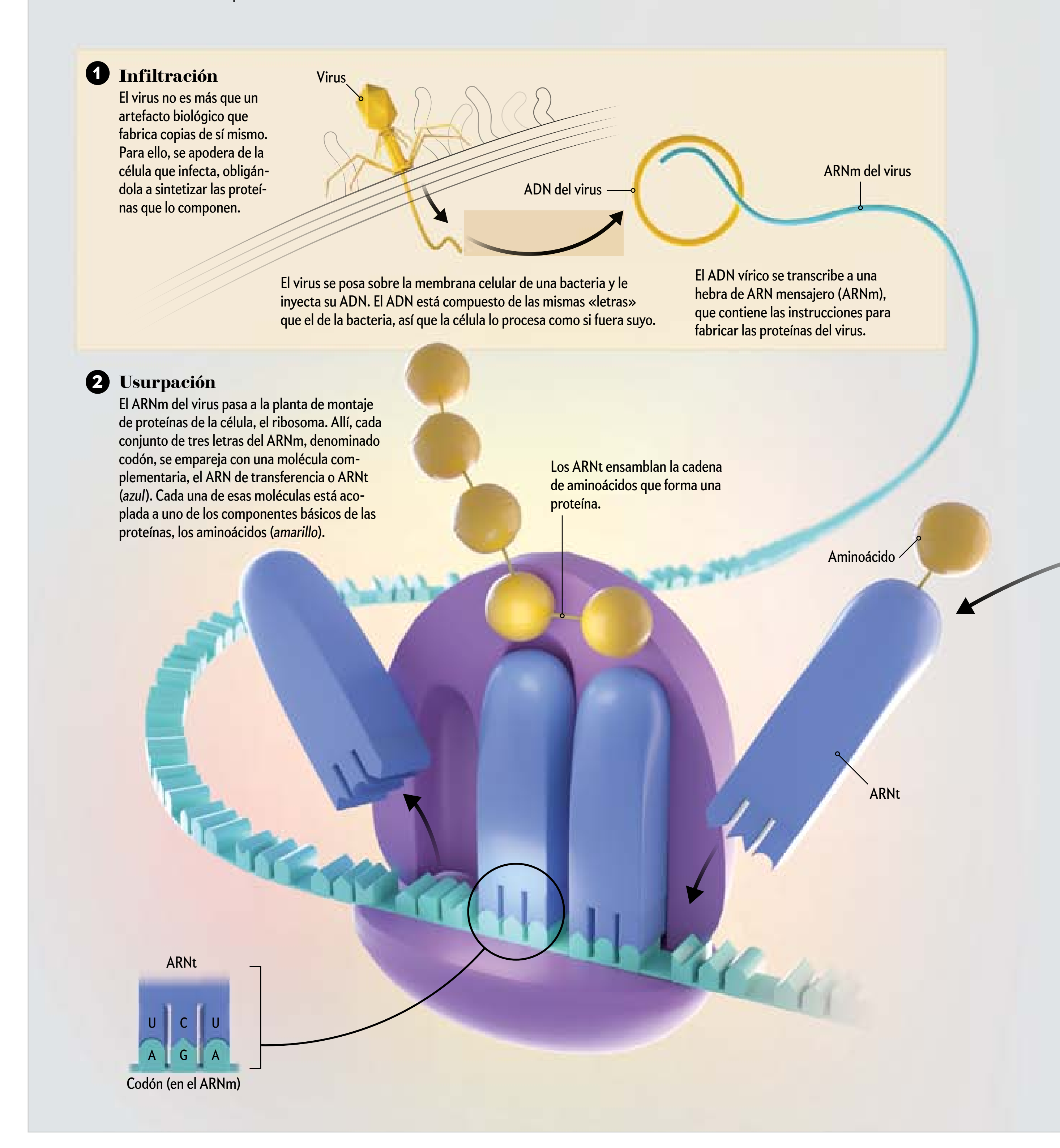
Los virus evolucionan a una velocidad vertiginosa. Church sospechaba que se sobrepondrían con facilidad a la desaparición de un solo ARNt. Pero si se eliminasen suficientes codones y ARNt, sería casi imposible que el virus diese de manera espontánea con la combinación precisa de mutaciones para usar el nuevo código. *E. coli* tiene siete codones que son relativamente infrecuentes y que están presentes en cada uno de sus 3548 genes, 17 veces en cada gen por término medio. Si se eliminan todos los ARNt correspondientes, el virus tendrá que desarrollar 60.000 secuencias nuevas, exactamente una por cada codón sustituto y en la posición adecuada. Y eso es algo que no va a ocurrir.

En 2004, esta hipótesis era una mera fantasía. Si ya resultaba harto difícil modificar un solo gen en un organismo, habría sido imposible editar miles de genes para eliminar todas las apariciones de un codón concreto. Sin embargo, en 2014, la tecnología había avanzado tanto que la idea se antojaba más concebible. Así que Church se puso a buscar a alguien que tuviese la energía y el tesón para emprender el mayor proyecto de edición génica de la historia.

En ese momento llegó Ostrov a su laboratorio como investigadora posdoctoral. Si Church era el arquitecto de *rE.coli-57,* Ostrov asumiría la función de ingeniera y directora de obra. Ya traía consigo mucha experiencia en la construcción de mo-

Detener el ataque de un virus

Existen millones de virus que infectan y se apoderan de las células humanas y de bacterias, convirtiéndolas en fábricas de más virus. Un equipo de biólogos está rediseñando el ADN de una bacteria, que han apodado *rE.coli-57*, con genes que le permiten funcionar con normalidad pero la hacen invulnerable a todos los virus.



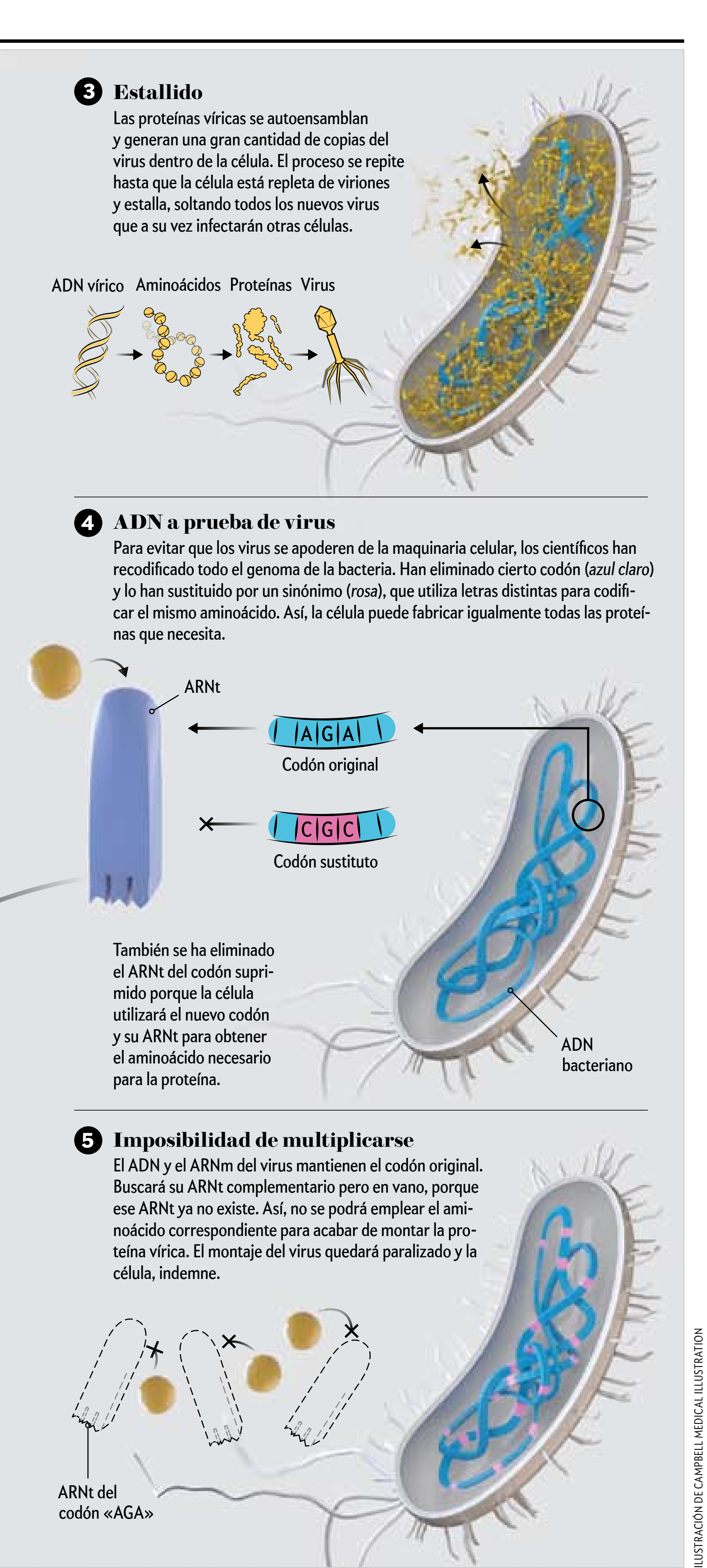


ILUSTRACIÓN DE CAMPBELL MEDICAL ILLUSTRATION

léculas. Criada en Israel, había cursado sus estudios en la Universidad de Tel Aviv, donde modificó una proteína añadiéndole una serie de aminoácidos a los que se unía una partícula metálica. Cuando se ensamblaron varias de estas proteínas, se formó un nanocable que transmitía la corriente. «Fue maravilloso», recuerda Ostrov. «Me pareció genial poder utilizar la biología para fabricar cosas útiles.» Posteriormente, en la Universidad de Columbia, en Nueva York, se doctoró con el diseño de una levadura de pan que produce un pigmento rojo cuando entra en contacto con microbios patógenos; el proyecto obtuvo el premio Grand Challenge Exploration de la Fundación Bill y Melinda Gates, por su aplicación para detectar el cólera.

Aunque el currículum de Ostrov era impresionante, el proyecto de Church revestía una dificultad mucho mayor. Los siete codones que había que eliminar aparecían 62.214 veces en el genoma de *E. coli*. Para recodificarlos todos había que hacer 148.955 cambios en el ADN. A pesar del sensacionalismo imperante en torno a la edición génica rápida y fácil, la verdad es que no existía ninguna herramienta capaz de hacer tantos cambios, ni de lejos.

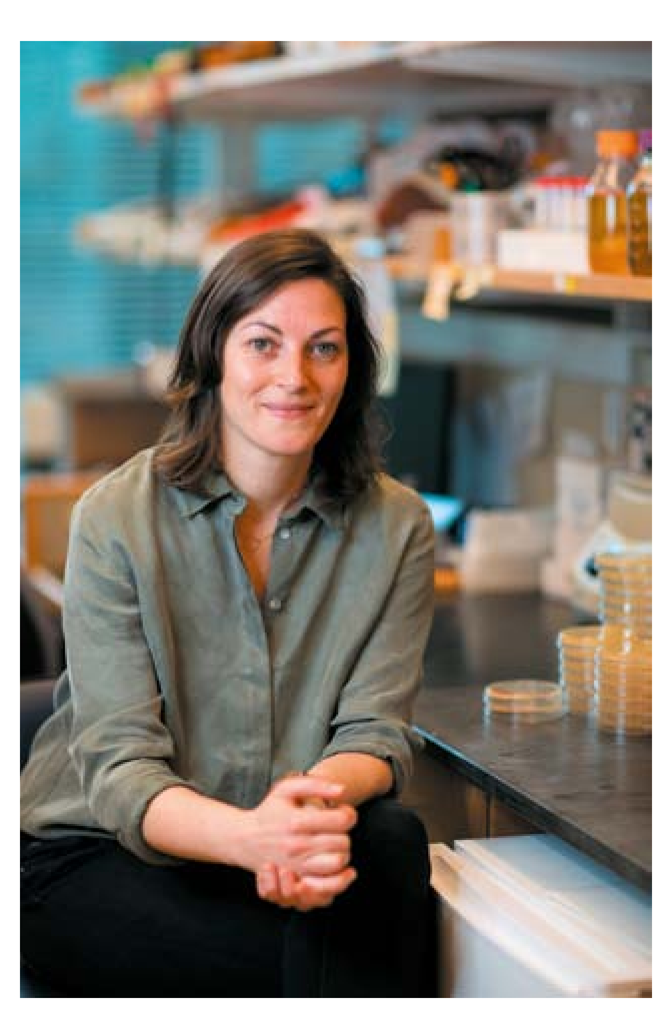
Los avances en la síntesis de ADN apuntaban a otra solución: construir un genoma recodificado partiendo de cero. El ADN puede fabricarse en impresoras bioquímicas especiales, que, como las de chorro de tinta, imprimen las A, las C, las G y las T. Hoy en día, las empresas de síntesis de ADN fabrican fragmentos de hasta 4000 letras, con garantías de calidad.

Hacia 2015, el equipo de Ostrov descargó de una base de datos el genoma estándar de *E. coli,* una larga secuencia de cuatro millones de letras, y lo pasó a un ordenador. Revisaron toda la secuencia y, en un total de 62.214 casos, reemplazaron los siete codones infrecuentes por los sinónimos correspondientes. (Por seguridad, también modificaron algunos genes para que la bacteria dependiese de un aminoácido sintético incluido en su caldo nutritivo. La molécula sintética no existe en la naturaleza, de modo que la bacteria moriría si llegase a escapar del laboratorio.) El resultado fue el genoma de *rE.coli-57,* visualizado en pantalla. A continuación dividieron los cuatro millones de letras en fragmentos de 4000, con extremos superpuestos, y enviaron los archivos a una empresa de síntesis de ADN. «Hicimos el corta-pega en el ordenador», explica Ostrov, «literalmente, como en un documento de Word». La empresa imprimió el ADN y lo envió por mensajería. Con los fragmentos de 4000 letras, el equipo científico montó 87 fragmentos más grandes, de 50.000 letras cada uno, lo que corresponde a unos 40 genes.

Esos fragmentos eran solo ADN, por supuesto, y el ADN no es más que un código. Hace falta una célula para que ese código se convierta en vida, y nadie sabe fabricar una célula desde cero. Así que Ostrov optó por ir paso a paso. Partiendo de colonias de *E. coli* normales, fue sustituyendo cada uno de los fragmentos de su genoma por otro recodificado, comprobando después de cada trasplante si las colonias sobrevivían.

RECONSTRUIR UNA CÉLULA

Sobre las poyatas del laboratorio de Church, entre centrífugas, agitadoras, pipetas y pilas de placas de Petri, el equipo de Ostrov cultivó 87 colonias de *E. coli* normales en una incubadora del tamaño de una mininevera, le insertaron a



EL EQUIPO dirigido por la bióloga Nili Ostrov, de la Universidad Harvard, ha creado *rE.coli-57*, una bacteria de *E. coli* en cuyo ADN han introducido casi 150.000 modificaciones para hacerla invulnerable a los virus.

cada colonia uno de los fragmentos recodificados de 50.000 letras y esperaron a ver si sobrevivían. Ostrov no tenía muchas esperanzas. Quizá la evolución eligió los codones que eligió por motivos ajenos a la comprensión humana.

Sorprendentemente, la mayoría de las colonias prosperaron y solo 20 de los segmentos modificados impidieron que proliferasen. Sin embargo, era imprescindible que ninguno diese problemas: todas las secciones recodificadas tenían que funcionar para que *rE.coli-57* fuese inmune a los virus. «Primero intentamos encontrar qué gen concreto no funcionaba», cuenta Ostrov. «Dividimos el segmento de 40 genes en dos versiones de 20 y las probamos. De ahí, nos quedamos con cuatro genes que podían ser los problemáticos. Luego con uno. Y así descubrimos qué codón era el que daba problemas.»

Resultó que la mayoría de los contratiempos tenían que ver con errores de impresión del ADN: las secuencias de ADN que recibió el equipo de Ostrov no eran exactamente las que habían encargado, algo que era habitual hasta hace poco en la síntesis de ADN. Cuando sustituyeron el ADN defectuoso, funcionaron más del 99 por ciento de los genes rediseñados. La recodificación, a fin de cuentas, no era tan descabellada.

No obstante, quedaban algunos problemas que sí afectaban a la función del ADN o de las proteínas y no a la calidad de la impresión. Ostrov tuvo que desentrañar un misterio evolutivo: ¿por qué la sustitución de un codón por un sinónimo, que codifica exactamente el mismo aminoácido, dañaba o mataba al organismo?

Salvar estos escollos fue como desbrozar un camino sin mapa en medio de la maleza más salvaje. Por ejemplo, la reproducción de las bacterias con la sección 21 recodificada se quedaba prácticamente estancada; ¿por qué? Como no había bibliografía científica sobre estos tramos de ADN recodificados que guiase a Ostrov —su equipo es el primero que los rediseña—, analizó meticulosamente el funcionamiento de todos los genes de la sección, comparando sus productos con los de las bacterias normales. Encontró cinco genes relacionados que estaban intactos pero que, por alguna razón, no funcionaban.

El problema tenía que ver con el equivalente genético de un interruptor. Los genes van precedidos de unas secuencias, denominadas promotoras, que controlan si el gen está activado o desactivado. En las formas de vida superiores, se hallan claramente diferenciadas de los genes, con puntos evidentes de inicio y fin, pero en las bacterias a veces se superponen: la secuencia de ADN al final de un gen funciona al mismo tiempo como principio del siguiente. Ostrov descubrió que una secuencia de ADN del gen *yceD* actuaba dos veces como promotora (como interruptor) de los cinco genes que seguían. Al recodificar *yceD,* los había inactivado por error. Cambió tres codones de *yceD* para que su ADN se asemejase más al de una potente secuencia promotora. Los cinco genes comenzaron a generar sus respectivas proteínas y las bacterias volvieron a reproducirse con normalidad.

El equipo de Ostrov se enfrentó a un reto todavía mayor con la sección recodificada número 44, que había ocasionado la muerte de toda la colonia en la que se insertó. Los investigadores acotaron el área responsable hasta el gen *accD,* que las bacterias utilizan para fabricar ácidos grasos. Los organismos recodificados no sintetizaban la proteína codificada por *accD*. Ostrov analizó el diseño del gen recodificado y supuso que el fallo estaba justo al comienzo de la secuencia. En el ADN, las A se unen de forma natural con las T, al igual que las G con las C. (En el ARN mensajero, la molécula que transmite el mensaje del ADN al ribosoma donde se fabrican las proteínas, la T está sustituida por la base uracilo, o U, que se une a la A con la misma especificidad.) Si las letras están en un orden determinado (por ejemplo, muchas A seguidas de muchas T), el extremo de la molécula puede plegarse sobre sí mismo, como si fuera cinta adhesiva, y taponar la maquinaria celular. En el ordenador, Ostrov rediseñó el gen, revisando 10 de los 15 codones recodificados, que cambió por sinónimos que parecían menos propensos a replegarse. Cuando insertó el nuevo fragmento de ADN en las bacterias, la colonia volvió a la vida.

Así fue avanzando este equipo de científicos, solucionando un problema cada vez, manipulando la biología pero con mentalidad de mecánicos, y siempre respetando el ciclo de diseño, construcción y ensayo de los ingenieros. Llama la atención que hasta el momento no hayan encontrado ningún obstáculo insalvable. «Por ahora no ha habido nada que no hayamos resuelto», dice Ostrov. «El código nos deja mucho margen de maniobra.»

INMUNIDAD A LOS VIRUS

El año pasado, después de añadir segmentos genéticos funcionales de una cepa a los segmentos funcionales de otra, Ostrov pasó de las 87 cepas originales a ocho estirpes sanas, cada una con una octava parte de su genoma totalmente recodificado. Cada vez que

STEPH STEVENS

los científicos combinaron los segmentos, aparecieron nuevas incompatibilidades que fue preciso solventar, pero a principios de la primavera ya había ocho estirpes que se estaban convirtiendo en cuatro, para ser dos poco después. Dentro de poco habrá una única cepa de *rE.coli-57,* recodificada al cien por cien.

Cuando esa cepa esté lista, el último paso será eliminar el ARNt asociado con los codones que faltan. A la célula no le pasará nada, porque sus genes utilizarán los ARNt sinónimos que sigue teniendo, pero los virus que penetren en su interior correrán peor suerte: sus genes, que no habrán sido modificados, tendrán algunos codones que requieren un ARNt que ya no existe. Sin el ARNt, la célula no aportará el aminoácido correspondiente a la síntesis proteica y el ensamblaje se paralizará. Sin la proteína vírica, no se fabricarán más copias del virus. El ADN vírico quedará aislado dentro de la célula, estéril e inofensivo.

Ostrov tiene la intención de poner a prueba esta hipótesis en una versión microscópica de la película *Mad Max, más allá de la cúpula del trueno,* en la que el héroe, atrapado en una palestra, tiene que luchar contra una serie de villanos. La palestra será un pequeño recipiente de vidrio. Los biólogos añadirán el fago λ a una colonia sana de *rE.coli-57* y dejarán que se batan a muerte. Si las bacterias *rE.coli-57* sobreviven, agregarán otro virus bacteriófago y, después de ese, otro más. Según todas las previsiones, hasta el más implacable de los virus será incapaz de descifrar el código de *rE.coli-57* después de tamaña modificación de su genoma. Aunque también es cierto que ninguno ha tenido que intentarlo hasta ahora. Dos organismos entran, solo uno sale.

Ostrov se muestra demasiado precavida para adelantar la fecha de la contienda, porque todavía no dispone de la cepa totalmente recodificada, pero cree que les falta poco. «Sin duda, más pronto que tarde», dice, e insinúa que se marchará a Brasil a celebrarlo: «Cuando lo hayamos logrado, no me lo callaré. Os llamaré desde la playa con una caipiriña en la mano».

La inmunidad a los virus sería motivo suficiente de celebración, pero la bacteria también ofrecerá, tal como exponen Ostrov y sus colegas en su artículo de *Science,* «un chasis excepcional, con funcionalidad sintética ampliada, que tendrá muchísimas aplicaciones en biotecnología». Dicho de otro modo, el microbio será un armazón flexible en el que podrán montarse nuevos tipos de proteínas.

El logro sería un gran estímulo para el desarrollo de medicamentos. Muchos fármacos de inmunoterapia y oncología son proteínas que se degradan con rapidez después de su administración, pero reconstruirlos con aminoácidos exóticos podría alargar notablemente su presencia en el organismo. Church ya ha fundado una empresa emergente (*start-up*) para diseñar fármacos con dichas técnicas, que ha bautizado con el nombre de GRO Biosciences (la sigla inglesa corresponde a organismo con el genoma recodificado).

ALTERAR LA VIDA

A unos años vista, se atisba la idea de conseguir células humanas que sean inmunes a los virus. Así se solucionaría el problema de la contaminación vírica en las líneas celulares que se utilizan en investigación (como las famosas células cancerosas de Henrietta Lacks). En los laboratorios, las líneas de células humanas se utilizan de ordinario como medios de experimentación en los que ensayar fármacos e ideas para tratamientos. Pero cuando los virus infectan las células, es casi imposible deshacerse de ellos y hay que desechar los experimentos, así que los científicos se ven obligados a empezar de cero. Acelerar el desarrollo de los tratamientos salvaría vidas. Church también es miembro fundador del Centro de Excelencia de Bioingeniería (CEEB, engineeringbiologycenter.org) una entidad internacional sin ánimo de lucro que se ha fijado como proyecto inicial la recodificación de células humanas. La cepa *rE.coli-57* es claramente un paso intermedio en ese camino.

No es de extrañar que los detractores se lleven las manos a la cabeza. Por lo pronto, las células humanas recodificadas quizá no funcionen exactamente igual que sus homólogas naturales. Los científicos del CEEB solo se proponen obtener líneas celulares en cultivo, pero hay quien entrevé la posibilidad de crear un ser humano recodificado que sea invulnerable a los virus.

«Sería una mala idea», afirma el virólogo Vincent Racaniello, de la Universidad Columbia, que abordó el asunto en su blog sobre ciencia. «La multiplicidad de codones existe por algo; entre otros motivos, es un mecanismo de seguridad contra mutaciones potencialmente mortíferas», escribe. «Recodificar el genoma humano de esa forma entrañaría, con toda probabilidad, efectos secundarios graves.»

Los biólogos añadirán los virus a una colonia de rE.coli-57 _para que libren un combate a muerte_

Ninguno de los científicos del proyecto propone la temeridad de editar el ADN de un bebé para ver qué ocurre, como sí hicieron en China el año pasado. Lo que sostienen es que un estudio meticuloso y transparente de las células humanas recodificadas renovaría nuestro conocimiento sobre la relación entre los humanos y las enfermedades que nos afligen. Desde que existimos sobre la faz de la Tierra, tenemos el mismo sistema de 64 codones, y los virus se aprovechan de él. Dentro de unos años sabremos si debemos conformarnos con esta situación o no.

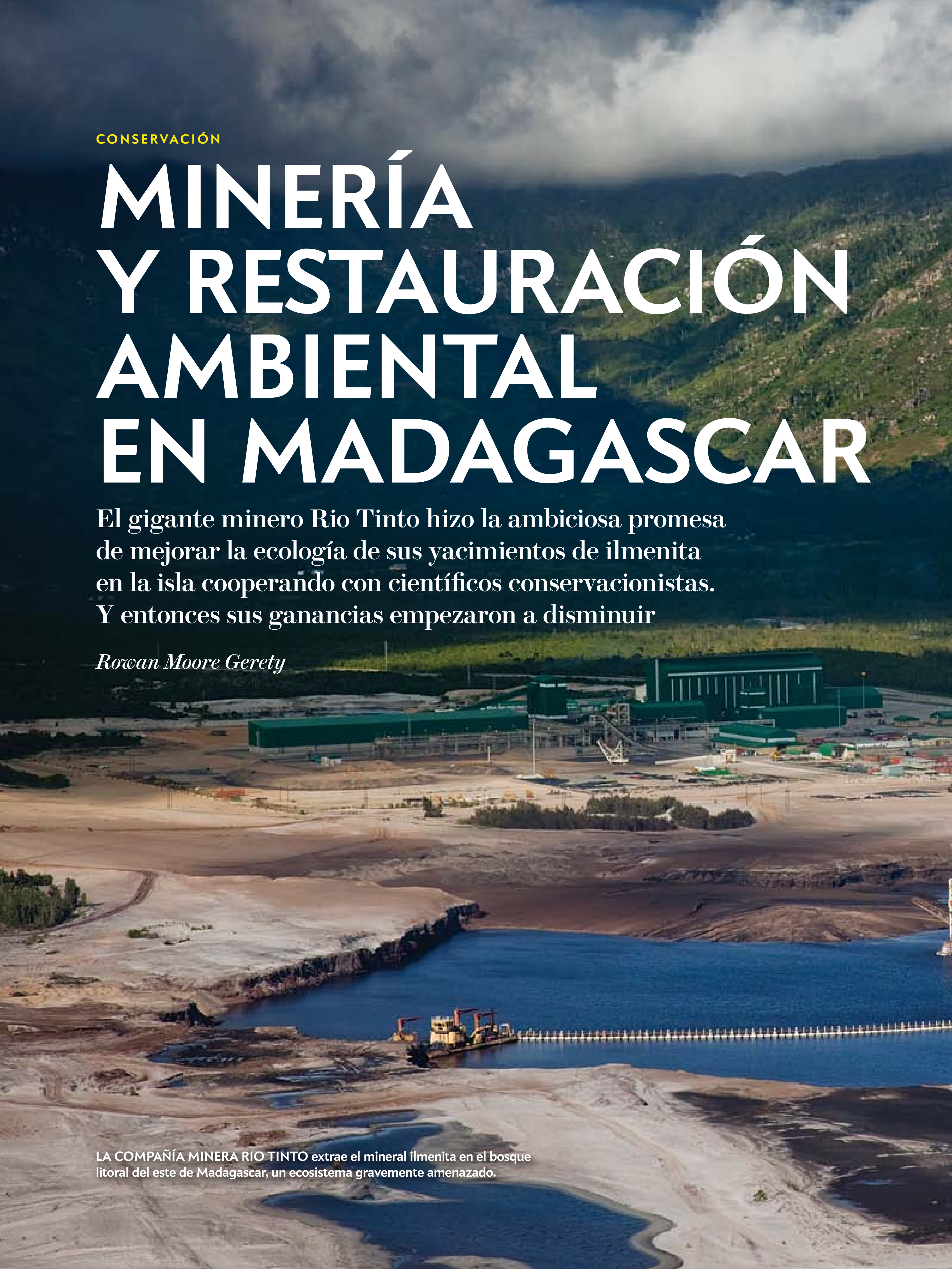
Ostrov no forma parte del CEEB —«Que quede claro: no recodifico células humanas»—, pero afirma que es importante explorar los interrogantes científicos con garantías de seguridad, en placas de laboratorio. «Es evidente que la evolución ha elegido esos codones por algún motivo, pero sabemos que hay otras opciones viables», explica. «Si los cambiamos, podemos investigar qué ocurre. Veremos lo que funciona y lo que no, y entenderemos mejor las reglas del juego.» Con ese conocimiento, tal vez podamos perfeccionar los organismos que se rigen por dichas reglas. IyC

PARA SABER MÁS

Design, synthesis, and testing toward a 57-codon genome. Nili Ostrov et al. en *Science,* vol. 353, págs. 819-822, agosto de 2016.
Beyond editing to writing large genomes. Raj Chari y George M. Church en *Nature Reviews Genetics,* vol. 18, págs. 749-760, diciembre de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Simulación de una célula viva. Markus W. Covert en *IyC*, marzo de 2014.
Computadoras biológicas. Timothy K. Lu y Oliver Purcell en *IyC*, junio de 2016.
Bacterias genomodificadas para curar. Michael Waldholz en *IyC*, junio de 2017.



CONSERVACIÓN

MINERÍA Y RESTAURACIÓN AMBIENTAL EN MADAGASCAR

El gigante minero Rio Tinto hizo la ambiciosa promesa de mejorar la ecología de sus yacimientos de ilmenita en la isla cooperando con científicos conservacionistas. Y entonces sus ganancias empezaron a disminuir

Rowan Moore Gerety

LA COMPAÑÍA MINERA RIO TINTO extrae el mineral ilmenita en el bosque litoral del este de Madagascar, un ecosistema gravemente amenazado.



Rowan Moore Gerety es periodista, productor radiofónico y autor del libro *Go tell the crocodiles: Chasing prosperity in Mozambique* (The New Press, 2018). El viaje que realizó para la elaboración de este artículo fue pagado con una beca de Mongabay.



En el bosque de Mandena, en Madagascar, bajo las palmas del viajero (*Ravenala*), con hojas que recuerdan a las del plátano, el suelo está cubierto de sus vainas de semillas de color azul eléctrico. Cuando cae la noche, los lémures ratón gris salen de las madrigueras para alimentarse de insectos, flores y fruta. Durante la estación de lluvias, se acumula agua en el lugar donde los grupos de hojas largas se unen al tronco de los pandanos. Se forma un reservorio lo bastante grande como para que pequeños bancos de renacuajos crezcan hasta alcanzar la madurez antes de que, en abril, se seque el agua. Las ranas *Guibemantis annulatus*, con bandas de color blanco brillante en los dedos membranosos, encuentran allí el lugar perfecto en el que criar a su próxima generación, protegida de posibles depredadores. Adornadas con manchas de leopardo y no más grandes que el pulgar de un niño, las ranas realizan una puesta pegajosa sobre el agua y permanecen vigilantes durante casi una semana, hasta que su descendencia se hunde en la diminuta charca y empieza a nadar.

Una vez en el lugar, da la impresión de que en este rincón de Mandena resulte fácil perderse. Pero por encima del dosel arbóreo se vislumbra la realidad. Tiempo atrás, el bosque alcanzaba el horizonte. Lo que ahora queda es de menor tamaño que el Parque Prospect de Brooklyn. Se tarda menos de media hora en ir caminando de un extremo al otro del bosque, encerrado entre una mina a un lado y una aldea en constante expansión al otro.

Madagascar se liberó del territorio que dio lugar a África e India hace casi 100 millones de años. Durante eones, la evolución producida como consecuencia del aislamiento dotó a la isla de una riqueza ecológica sin precedentes: cuatro de cada cinco plantas y animales no se encuentran en ningún otro lugar, un extenso abanico de especies que ocupan una variedad de nichos muy especializados. Las 83 especies de pandanos del país sirven como zonas de cría para docenas de reptiles y anfibios. Pero la relación entre este árbol y esta rana en particular ha quedado confinada a unos pocos fragmentos forestales, como el de Mandena, dispersos a lo largo de la costa sudeste de Madagascar. Dos de los tres retazos boscosos en los que todavía vive la rana se hallan en una concesión perteneciente a Rio Tinto, una de las compañías mineras más grandes del mundo.

Rio Tinto llegó a Madagascar en la década de 1980, en busca de ilmenita, un mineral que se utiliza para fabricar dióxido de titanio. Este proporciona un pigmento blanco que se emplea en toda una serie de productos, desde pinturas y plástico hasta dentífrico. En los sondeos se descubrió un filón cerca de Tolagnaro (Fort Dauphin), en el extremo sudeste de la isla. Los depósitos de ilmenita que interesan a la compañía yacen bajo los densos bosques de hoja perenne que quedan. En el pasado crecían sobre dunas de arena a lo largo de la mayor parte de la costa oriental, formando una franja continua que cubría unas 465.000 hectáreas. Desde que los humanos colonizaron la isla hará unos 2000 años, estos bosques litorales se han reducido hasta alcanzar, como mucho, un 10 por ciento de su superficie original. Por lo tanto, la concesión de Rio Tinto se extiende sobre uno de los ecosistemas más amenazados del planeta.

Normalmente, el descubrimiento de tanta riqueza bajo el suelo de un ecosistema ya de por sí vulnerable supondría una sentencia de muerte para la mayoría de los organismos que viven allí. Pero, en 2004, los ejecutivos de Rio Tinto, cuyo cuartel general se halla en Londres, volaron hasta Bangkok, donde se celebraba un importante congreso organizado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Científicos, ecologistas y líderes gubernamentales y de negocios se reunieron para valorar cuánto costaría un replanteamiento drástico de las relaciones de la minería con el mundo natural. Acordaron que, en adelante, la compañía no solo intentaría limitar el daño ambiental que causaba, sino que mejoraría la ecología de los lugares más delicados en los que se ubican sus yacimientos. Y empezarían con la concesión minera del sudeste de Madagascar.

Los ecologistas acogieron la propuesta con entusiasmo. Tenían razones para el optimismo: Rio Tinto y su predecesora ya habían colaborado con científicos del Jardín Botánico de Misuri a lo largo de más de un decenio, durante la que financiaron y dirigieron estudios botánicos sobre especies nuevas descubiertas en la zona de la concesión minera. Quedaban detalles por resolver y no se

EN SÍNTESIS

En 2004, la compañía minera Rio Tinto se comprometió a mejorar la ecología de sus yacimientos en las zonas más vulnerables. Empezarían en Madagascar, donde la empresa estaba extrayendo el mineral ilmenita.

Los ecologistas que trabajan en Madagascar, una tierra rica en especies que no se encuentran en ningún otro lugar del mundo, se asociaron con Rio Tinto para ayudarles a cumplir su promesa.

Finalmente, Rio Tinto se retractó, lo que planteó el interrogante sobre si las compañías mineras y los ecologistas pueden colaborar de manera eficiente en temas de gestión ambiental.

PÁGINAS ANTERIORES: ED KASHI, REDUX PICTURES



AMANECE EN TOLAGNARO (Fort Dauphin), Madagascar. Unos 70 millones de toneladas métricas de ilmenita yacen bajo el bosque litoral de esta región.

MARTELET CHRISTIAN, GETTY IMAGES

había establecido ningún objetivo concreto, pero, si Rio Tinto seguía adelante con esa idea, tendría el potencial de «contagiar» a la industria, obligando a las compañías mineras a disputarse los permisos en función de sus programas ambientales.

Como parte de esta iniciativa conservacionista, Rio Tinto creó lo que llamó comité de biodiversidad, compuesto por investigadores y gestores sin ánimo de lucro que pudieran ayudar a su filial local, QIT Madagascar Minerals (QMM), a elaborar y llevar a cabo trabajos ambientales en los márgenes de lo que prometía ser una mina gigantesca. El Gobierno de Madagascar tendría una participación del 20 por ciento en QMM, una inversión que podría generar unos ingresos de cientos de millones de dólares con el transcurso del tiempo. Para los científicos del grupo, unirse al comité representaba un salto al vacío. Su participación podría prevenir grandes daños y conseguir que se aprovechase la inversión de Rio Tinto para proteger el ambiente. Pero también implicaba que compartirían la culpa de cualquier cosa que saliera mal.

Y no tardó mucho en ocurrir. Cuando el comité llevaba un par de años funcionando, sus miembros mostraron preocupación porque QMM no estaba en camino de cumplir con sus objetivos relacionados con la biodiversidad. Cuando los precios de la ilmenita se desplomaron durante la Gran Recesión, las prioridades de Rio Tinto cambiaron, y, en 2016, la compañía no cumplió con su promesa conservacionista. En cambio, adoptó el vago objetivo de evitar hacer las cosas «mucho peor». Actualmente, la actividad minera cercana a Mandena está a punto de acabar con este paraíso de la biodiversidad. Para la gente que allí vive y para docenas de especies endémicas, como la rana arbórea antes citada, su destino depende del resultado de este experimento a largo plazo. Ello sentará un precedente sobre el papel de la industria en la conservación y sobre la labor que los ecologistas pueden desempeñar en la industria minera.

En su estado natural, la ilmenita se acumula en los sedimentos profundos depositados por ríos y corrientes de agua que cambiaron su curso hace mucho tiempo; forma una arena negra tan pesada que se separa de los minerales más ligeros de la superficie. Para extraer el mineral, los mineros primero utilizan retroexcavadoras y motosierras para retirar cada retazo de vegetación de cada zona y la apilan en gigantescos montículos de compost. Las excavadoras hacen una zanja de varios pisos de profundidad y más larga que un campo de fútbol americano, que a continuación se llena del agua desviada de un río cercano. Una draga remueve arena de una profundidad de más de 18 metros y la bombea hacia un contenedor a través de un tubo descomunal, donde la gravedad separa una parte de la mena de ilmenita de la arena, del mantillo y de los materiales más ligeros. Enormes «serpientes negras» (tuberías provisionales) atraviesan la zona, conduciendo el lodo rico en mineral hacia una resplandeciente planta procesadora ecológica cercana al agua. Se utiliza la separación electrostática para extraer más ilmenita antes de que la arena y la tierra desmineralizadas sean expulsadas de nuevo sobre el paisaje circundante.

Rio Tinto descubrió la existencia de ilmenita cerca de Tolagnaro en 1986. En esa época, los bosques de la región ya estaban bastante fragmentados y degradados debido a la actividad humana. Pero la prospección realizada por la compañía supuso la construcción de nuevas carreteras hacia la zona y una afluencia de personas en busca de trabajo. Ello aceleró la deforestación que ya estaba en marcha a causa de la producción de carbón vegetal y la creación de nuevas tierras de labranza para abastecer a la creciente ciudad.

Rio Tinto determinó que la región alrededor de Tolagnaro contenía unos 70 millones de toneladas métricas de ilmenita, una cantidad suficiente para abastecer el 10 por ciento del mercado mundial durante una década o más, y empezó a elaborar un plan para extraerla. La compañía puso su mirada en tres zonas ricas en ese mineral situadas a lo largo de la costa, que abarcaban en total unas 6000 hectáreas. La extracción empezaría en el yacimiento de 200 hectáreas de Mandena para después expandirse hacia el norte hasta Sainte Luce, y hacia Petriky, más al sur; continuaría durante toda la vida de la mina, unos 60 años desde la fecha de la primera producción, todo ello según el pronóstico de la compañía. Rio Tinto calculó que, una vez acabado el proyecto, se habrían perdido unas 1665 hectáreas, o el 3,5 por ciento, del bosque litoral que quedaba en Madagascar.

Al tiempo que Rio Tinto exploraba la zona para evaluar la extensión total de los depósitos de ilmenita, ponía en marcha una serie de estudios ambientales. Como parte de ello, impulsó uno de los primeros inventarios botánicos de los bosques de la costa oriental de Madagascar; Rio Tinto sabía que tenía más posibilidades de asegurarse los permisos de extracción si demostraba que había actuado diligentemente respecto a la extensión del daño ambiental que causaría la explotación. El botánico Pete Lowry y sus colaboradores del Jardín Botánico de Misuri recogieron y documentaron cada especie vegetal que hallaban.

Al descubrir docenas de plantas desconocidas, los investigadores se sorprendieron de que numerosas especies parecían crecer sobre la arena blanca, sin más. El equipo estaba trazando un esbozo de un ecosistema apenas conocido para la ciencia. Rio Tinto se asoció con investigadores de primera línea de todo el mundo para financiar estudios sobre más de 40 especies que no se habían descrito hasta entonces y que se habían descubierto en los terrenos de la concesión minera.

A pesar del apoyo que brindó Rio Tinto a la investigación sobre la ecología en Madagascar a inicios de la década de 2000, la trayectoria de la compañía a escala mundial le había supuesto una reputación como actor sin escrúpulos en una industria muy contaminante. En Papúa Nueva Guinea, donde Rio Tinto había explotado una gigantesca mina de cobre durante la década de 1980, las protestas por el tratamiento dispar que la compañía tenía con los empleados extranjeros blancos y con los trabajadores locales forzó el cierre de la mina y contribuyó a desencadenar una guerra civil. Treinta años después, Rio Tinto ya no está, pero todavía harán falta mil millones de dólares para limpiar la contaminación provocada por la mina inactiva de Panguna.

Con este panorama tan turbulento, Rio Tinto fue a Bangkok en 2004 para anunciar la puesta en marcha de un proyecto piloto de conservación en Madagascar. La compañía llamó a esa estrategia «efecto positivo neto» (NPI, por sus siglas en inglés). Se comprometían a que los ecosistemas locales de Mandena, Sainte Luce y Petriky (todos los cuales se caracterizaban por una biodiversidad especialmente alta) gozarían de una mejor salud con la explotación minera que la que hubieran tenido sin ella. En 2005, Rio Tinto empezó a dar a conocer los detalles de su plan. Evitarían excavar en las zonas boscosas bien conservadas de cada uno de los tres yacimientos, llevarían a cabo una restauración ecológica sin precedentes de los lugares afectados por la extracción e invertirían en contrapartidas por la pérdida de biodiversidad en bosques de otras áreas para compensar el daño que pudieran haber causado en el lugar de extracción. El comité de biodiversidad ayudaría a la compañía a cumplir con su promesa.

Esa asociación no sentó muy bien a algunos ecologistas. Barry Ferguson, investigador ambiental afincado por entonces en Tolagnaro, entendió el acuerdo como una especie de «lavado verde» mutuamente beneficioso, en el que unos especialistas comprometidos de buena fe con la conservación vieron impulsadas sus carreras en investigación con estudios financiados por QMM. Otros observadores se mostraron escépticos de que Rio Tinto pudiera alcanzar jamás un efecto positivo neto en una zona tan sensible ecológicamente. Después de todo, docenas de especies vegetales solo se hallan en las zonas de la concesión minera. La presencia de una especie particular de geco diurno, *Phelsuma antanosy*, con forma de flecha y de color verde neón con bandas rojas y destellos de turquesa en los machos, es incluso mucho más precaria. Confinado a un hábitat que se estima que ocupa menos de diez kilómetros cuadrados, el geco deposita los huevos en una única especie de pandano y se alimenta de insectos en el mismo árbol.

Cumplir con el NPI en Madagascar resultaría muy costoso. Rio Tinto calculó que tendría que renunciar a 1200 millones de dólares de ilmenita bajo tierra para no dañar las 624 hectáreas de bosque que se había propuesto no tocar y convertir en áreas protegidas. Restaurar los bosques dañados y crear las compensaciones debidas recortaría aún más sus ganancias.

Sin embargo, en su material promocional, la compañía a menudo explicaba el «modelo de negocio» basado en el NPI, con la idea de mostrar a los Gobiernos y a los inversores que


1


2

FRANCO ANDREONE

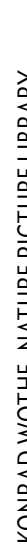
Rio Tinto era la mejor compañía para llevar a cabo proyectos que conllevaran riesgos sociales y ambientales importantes. Tal como lo entendía Lowry, «estar en lo más alto le otorgaría a Rio Tinto una ventaja comercial». En 2006, Lowry pasó a presidir el comité de biodiversidad. Al principio, tenía la esperanza de que la mina de Madagascar, junto a otros dos proyectos piloto del NPI que Rio Tinto desarrollaba en Mongolia y Australia, podría ayudar a definir un nuevo camino para las relaciones entre la industria minera y el ambiente en una época en la que a las compañías les preocupaba que los riesgos sociales y ecológicos les pudieran privar de yacimientos potencialmente lucrativos. En 2008, Rio Tinto empezó allí sus actividades mineras de manera oficial.

Pero el modelo de negocio basado en el NPI pronto se tuvo que supeditar a lo que supone gestionar una mina rentable. Los mercados financieros globales cayeron estrepitosamente en los meses previos al inicio de los trabajos en Mandena, en diciembre de 2008, y el precio de las acciones de Rio Tinto se desplomó al tiempo que la compañía se preparaba para un descenso de la demanda. En mayo de 2009, salió de Madagascar el primer cargamento de ilmenita para ser procesado en Canadá; al final del año, la demanda del mineral había caído un 20 por ciento.

Durante un tiempo, Rio Tinto mantuvo parte de su promesa respecto a la conservación y permaneció alejada de las zonas que había decidido evitar. Pero solo con evitar estos lugares no era suficiente: los bosques se seguían degradando por la falta de



LOS YACIMIENTOS MINEROS DE RIO TINTO en Madagascar son el hogar de una serie de especies en peligro de extinción, entre ellas la rana arbórea *Guibemantis annulatus* (*1*), el geco diurno *Phelsuma antanosy* (*2*) y el lémur marrón de collar (*3*). Algunas especies solo se encuentran en zonas de la concesión minera de la compañía.



una gestión activa y por los leñadores furtivos y los productores de carbón. Al comité de biodiversidad le empezó a preocupar que la compañía no estuviese incrementando sus trabajos de conservación de manera consecuente. En 2010, advirtió: «La extinción de especies es el mayor riesgo relacionado con la biodiversidad que corre QMM».

A partir de ese momento, las expectativas conservacionistas se fueron deteriorando. Se suponía que, entre 2010 y 2012, QMM tendría que haber añadido área boscosa mediante trabajos de restauración. Sin embargo, los informes de la compañía muestran que la deforestación ya cubría una superficie casi tan grande como la protegida en Mandena. Una zona importante, situada en Sainte Luce (hogar de cuatro de las siete especies en peligro crítico presentes en la zona de la explotación minera de QMM), estaba en camino de reducirse de más de 200 hectáreas a menos de cincuenta en 2024. Las advertencias reflejadas en las actas de las reuniones del comité de biodiversidad eran cada vez más apremiantes: «RIESGO IMPORTANTE DE NO LOGRAR EL NPI», escribieron sus miembros en 2012. Avisaban de que QMM estaba perdiendo la posibilidad de compensar el daño futuro causado por la mina.

Mientras tanto, una serie de enredos técnicos en Madagascar y una inversión muy costosa fallida en Mozambique, donde Rio Tinto pagó de más por una participación en una nueva mina de carbón, afectó a las ganancias de la compañía, lo que provocó recortes en toda la empresa. Aunque estos no afectaron a la financiación del programa ambiental, parecía muy difícil cumplir con el NPI. Se perdieron meses mientras Rio Tinto presionaba a QMM para que asumiera más responsabilidad y financiara el trabajo con sus propios fondos.

Aun cuando las dragas mineras devorasen constantemente las demás zonas de Mandena, QMM logró frenar casi por completo la deforestación en el área protegida. Pero Mandena es, de lejos, el yacimiento más fácil de gestionar de los tres y el menos importante en el tema de la biodiversidad. En 2015, el Plan de Acción a favor de la Biodiversidad de QMM advirtió que cumplir con el NPI requería detener de inmediato la degradación y la deforestación en las zonas de compensación y las protegidas de Petriky y Sainte Luce, y también reducir de forma drástica la pérdida de bosque en los terrenos exteriores a la zona de explotación.

Por último, en 2016, Rio Tinto abandonó oficialmente el NPI como mandato institucional. Un representante se reunió con el comité de biodiversidad de QMM para presentar un nuevo conjunto de medidas ambientales con las que reemplazar el NPI, destinadas a «minimizar el impacto residual». ¿Qué significaba eso exactamente?

Lowry comenta que las medidas no aportaban nada sustancial. Como más, Rio Tinto declararía públicamente que la respuesta sería específica para cada lugar, con proyectos individuales que pudieran gestionarse ambientalmente y que persiguieran, si así se deseaba, el efecto positivo neto.

Jörg Ganzhorn, ecólogo de la Universidad de Hamburgo que había estado colaborando con Rio Tinto y QMM durante más de diez años, se quedó atónito. «Entiendo que, como compañía minera, no se busque el efecto positivo neto de biodiversidad. Este no es su objetivo», afirma. Pero nadie obligó a Rio Tinto a publicitar ese modelo en su página web ni a enviar a su director ejecutivo a conferencias ambientales por todo el mundo para que hablase de la revolucionaria iniciativa de la compañía. «Fue en ese momento cuando decidí marcharme», explica Ganzhorn. Ese octubre, él, Lowry y los otros dos científicos que quedaban como asesores de Rio Tinto en Madagascar emitieron un comunicado con el que cortaban los lazos con la compañía.

Poco después, los ejecutivos de Rio Tinto difundieron una serie de puntualizaciones para explicar la dimisión, presentándola como fruto de un acuerdo mutuo «para actualizar los objetivos y prioridades del grupo». Según el comunicado, se crearía un comité nuevo y mejorado, en el que antiguos miembros echarían una mano para controlar su labor. Lowry era el único antiguo miembro que seguía abierto a la posibilidad de continuar participando en el proyecto. «Todavía hay mucho en juego. Si no formo parte del comité, no habrá nada que lo vincule con el trabajo que se ha estado haciendo durante los últimos 20 o 25 años.»

En julio de 2017, me embarqué junto a dos miembros del equipo ambiental de QMM en una ruta por Mandena, donde una mezcla de campos ondulantes, fragmentos forestales y humedales dan paso a las esquinas cerradas y líneas rectas de un yacimiento industrial. Un cernícalo de Madagascar estaba posado sobre el poste de una valla. Hileras de eucaliptus y acacias jóvenes ocupaban los extensos arenales por los que habían pasado las dragas mineras. Con el tiempo, QMM esperaba que esos árboles proporcionaran un suministro de madera y carbón a las comunidades que dependían de esos fragmentos boscosos que pronto serían explotados. Justo detrás del cuartel general de la compañía, QMM mantiene un vivero en el que crecen acacias y eucaliptus. También realiza experimentos con plantas autóctonas destinadas a restaurar una parte de las 675 hectáreas de bosque al final de la vida de la mina, allá por 2065.

Una familia de lémures mano gris (*Hapalemur griseus*) brincaban sobre una dependencia externa, mordisqueando unos brotes de bambú, mientras Faly Randriatafika, supervisor de los trabajos medioambientales de QMM, caminaba entre filas de diminutas plántulas colocadas en bandejas de plástico. Señaló hacia un arbolito de ocho centímetros de *Eligmocarpus cynometroides*, una palma larguirucha con semillas en forma de puño, de las que quedaban unos veinte ejemplares en la naturaleza, todos ellos en Petriky. «Resulta muy difícil hacer germinar esta planta; de quinientos frutos puede que tan solo se obtengan veinte semillas. Sin QMM, sin este proyecto, esta especie ya habría desaparecido por completo».

Lisa Gaylord, por entonces directora de relaciones corporativas, comunidades y desarrollo sostenible de la empresa, hizo una observación similar y más extensa sobre el destino de los bosques litorales de las inmediaciones de la mina de QMM. En la sucursal de QMM en Tolagnaro, sacó su portátil para enseñarme una serie de fotografías en la que se observaban los cambios producidos en la cubierta forestal alrededor de Sainte Luce durante la década precedente. Las manchas verdes se iban encogiendo año tras año como bancos de arena que desaparecen ante el empuje de la marea alta. La implicación era clara: mina o no mina, la producción de carbón y la agricultura acabarían con el poco bosque que quedaba. «No podíamos hacer nada, y te podría asegurar que todo el corredor boscoso va a desaparecer, me comentó. «Desaparecerá. Ese es el destino de Madagascar.»

Sin embargo, no cabe ninguna duda de que la minería afecta gravemente no solo a los bosques y a la vida salvaje, sino también a las personas. En la cima de una pequeña colina, sobre la explotación minera de Mandena, hay una aldea conectada por un camino de tierra lleno de baches a la cómoda carretera asfaltada que construyó QMM para su uso privado. El *chef fokontany* (jefe del pueblo), Francis Maka Teodorik, reunió a diez de sus vecinos para que hablaran conmigo en su casa, donde nos sentamos sobre alfombras tradicionales hechas de *mahampy*, una clase de junco que recogen en los humedales situados a lo largo de la costa. El tejido de *mahampy* ha sido desde hace tiempo la fuente principal de ingresos para las mujeres locales y, junto a la madera para construcción, combustible y producción de carbón, su suministro está menguando.

QMM ha financiado una parcela de demostración de humedales restaurados y cursos de formación para animar a las mujeres locales a que recolecten *mahampy* de forma sostenible cortándolo por encima de las raíces. Pero Teodorik y sus vecinos explicaron que estos esfuerzos escondían el impacto real de la mina de QMM. Helenette Raverosaotra, una madre de cuatro hijos cuya casa de dos habitaciones da a la planta procesadora de QMM, comentó que ahora necesitaba seis o siete viajes en lugar de solo uno para recolectar los suficientes juncos con los que poder tejer una alfombra que vende por menos de tres dólares, ya que los humedales de Mandena habían sido perforados uno a uno. «QMM ya ha destruido todo el *mahampy* que utilizábamos para confeccionar alfombras», apuntó Fidéline Jine, que ahora pasa los días pescando camarones en el río para ganar tan solo una fracción de lo que ganaba antaño. «Las minas han llenado de arena todos los lugares donde crecía la planta.»

Los agricultores locales, cuyas tierras fueron inundadas para crear un suministro de agua para la mina, tenían otro motivo por el que protestar. Durante años, se quejaron de que no habían recibido una compensación justa por la superficie de tierra que perdieron. Cuando, al fin, QMM aceptó evaluar la superficie de cultivos que les habían quitado, los resultados dieron la razón a los agricultores: QMM los había compensado por la pérdida de cuatro hectáreas cuando les había arrebatado más de seis veces esa cantidad. Finalmente, QMM les pagó la diferencia.



ED KASHI, REDUX PICTURES

Todo el mundo estaba de acuerdo en que, en la asociación entre la minería y la conservación, faltaba algo más: que la supervisión del Gobierno fuera más enérgica. «Las compañías mineras se esforzarían en conservar más si el Estado fuera más exigente», afirma Jocelyn Rakotomalala, que dirige una ONG en Tolagnaro llamada Saha y que trabaja con QMM en proyectos sociales y comunitarios en la zona.

Rio Tinto suele referirse a su compromiso con el NPI como un factor fundamental a la hora de obtener la aprobación del proyecto. Pero, tal como señala Heritiana Ravelojaona, directora provincial de minería en la región, el acuerdo que se firmó con el Gobierno malgache no obliga a nada que se parezca al NPI. «Fíjese en el tema de las compensaciones. Son compromisos voluntarios». Y respecto a Sainte Luce, donde los aldeanos han protestado repetidamente por la pérdida de acceso a las pequeñas áreas protegidas creadas por el proyecto, opina: «Ya no es asunto de QMM. Le compete al Estado decidir si protege la zona, y presentar una forma de satisfacer las demandas de la comunidad después de restringir el acceso».

Frank Hawkins, quien dirige en la actualidad la oficina de Washington D.C. de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, fue uno de los primeros científicos que trabajaron con QMM. Ahora cree que QMM ha sido un «rotundo fracaso» en cuanto a sus resultados sociales y ambientales. Pero Hawkins afirma que seguiría colaborando con ellos si hoy se empezara desde cero, porque la alternativa probable a Rio Tinto no es la ausencia de minas, sino minas construidas con medidas de protección ambientales totalmente insuficientes. El planeta está plagado de ejemplos. En 2016, en Butte, Montana, murieron miles de gansos de nieve cuando una tormenta los desvió hacia un depósito tóxico de una antigua mina de cobre a cielo abierto que había dejado de operar hacía décadas. En el delta del río Níger, una explotación petrolífera había vertido el equivalente a lo que vertió el *Exxon Valdez* cada año durante medio siglo. «La triste verdad es que al sector minero le es muy fácil negociar buenos tratos porque se está hablando de grandes sumas de dinero», explica Hawkins.



LAS MUJERES RECOLECTAN *MAHAMPY*, una clase de junco que crece en los humedales de toda la costa. El *mahampy* se recubre de arcilla y se seca antes de ser tejido. Para los aldeanos de las proximidades de Mandena, una de las explotaciones mineras de Rio Tinto, tejer *mahampy* ha sido durante mucho tiempo una fuente fundamental de ingresos. Pero el aporte de este junco ha menguado cuando los humedales se han llenado de arena procedente de la explotación minera.

En Ampasindava, una península situada al noroeste de Madagascar, los funcionarios malgaches de alto rango se han mostrado dispuestos a dar la aprobación a una empresa minera de tierras raras que está bajo investigación por falta de transparencia financiera, después de que presionara con éxito para explotar un trozo de un área protegida adyacente. En el suroeste de Madagascar, una empresa australiana está en las primeras etapas del establecimiento de otra gran mina de ilmenita, una que seguramente empeorará las restricciones de agua en un ecosistema árido que ya sufre los efectos de la sequía y la deforestación.

Pocos creen que el Gobierno malgache pida por adelantado más concesiones importantes de las compañías mineras interesadas. Hawkins apunta que le gustaría ver que los contratos sobre extracciones mineras se negocien en un contexto que incluya planes de desarrollo regional más amplios, de tal forma que los operadores turísticos o las organizaciones ecologistas puedan proporcionar un contrapeso y promover una visión más amplia de lo que es el desarrollo.

A su vez, Lowry está consternado porque la táctica del efecto positivo neto de Rio Tinto no parece haber impulsado un movimiento competitivo entre las compañías mineras en cuanto a la gestión ambiental. De hecho, los signos más esperanzadores para que la industria en África respete el ambiente se han generado de la forma más antigua, a través de la acción gubernamental. Chad, Sudán, Nigeria y Gabón, por ejemplo, han tomado medidas punitivas contra SINOPEC y la Corporación Nacional del Petróleo de China, dos gigantes petrolíferos propiedad del Estado chino, por la contaminación y las prácticas de gestión abusivas. Zambia se puso muy estricta con la minería del carbón como respuesta a las protestas locales por las condiciones laborales y la contaminación. Poco después de mi visita, en 2017, los funcionarios malgaches realizaron una visita de reconocimiento a una parte remota de la concesión de Rio Tinto para investigar las protestas de la comunidad contra la compañía. La reacción gubernamental fue mayor que la derivada de la carta de dimisión de los miembros del comité.

Si con esa reacción se consigue alguna medida significativa, ya es harina de otro costal. Rio Tinto ha reconocido que la explotación de Mandena había invadido una «zona de amortiguación» alrededor de un lago que proporcionaba tanto *mahampy* como agua potable a las comunidades cercanas, lo que aumentaba el riesgo de que los residuos radiactivos dejados por la extracción de ilmenita se filtraran en el suministro de agua. El reconocimiento llegó después de dos años de insistencia por parte de una organización benéfica británica que trabaja en la zona, Andrew Lees Trust, que tuvo que encargar un estudio a un geofísico independiente para demostrar lo expuesto. Pero resulta que el regulador ambiental de Madagascar (la Dirección Nacional de Medioambiente, financiada tanto con el dinero procedente de los permisos de extracción como de los concedidos a QMM) conocía ese incumplimiento desde hacía al menos un año. El departamento decidió no emprender ninguna medida reglamentaria.

Los compromisos más fiables de los grandes proyectos mineros parecen ser aquellos que vienen acompañados de dinero: en Mongolia, donde la Corporación Financiera Internacional (CFI) posee una participación en el proyecto de Rio Tinto, el efecto positivo neto sigue vigente, debido, en gran parte, a que va vinculado a las propias normas de funcionamiento de la CFI en gestión ambiental. En otros lugares de Madagascar, algunas de las asociaciones ambientales más exitosas entre el sector privado y las comunidades locales corresponden a la industria pesquera, donde existe una relación más clara entre los consumidores finales de Europa y los riesgos ecológicos de sus decisiones de compra.

Aun así, Lowry no se arrepiente de su decisión de trabajar con Rio Tinto, incluso después de ver cómo se hundió el NPI como modelo implantado en toda la empresa. «Creo que el punto en el que está actualmente QMM es mucho mejor que en el que hubiera estado, en términos de responsabilidad ambiental y social, si nunca hubiera existido un comité», declara. En 2018, Lowry decidió unirse al nuevo comité de gestión de la biodiversidad de los recursos naturales de QMM para intentar conservar alguna continuidad con el trabajo del grupo previo. En cierto sentido, lo que le convenció fue la retirada de Rio Tinto. Con QMM, al menos, las decisiones sobre la conservación no se toman en Londres. Desde sus oficinas en Tolagnaro, los bosques no son una simple abstracción. IyC

PARA SABER MÁS

Conservation status of vascular plant species from the QMM/Rio Tinto mining area at Mandena, Tolagnaro (Fort Dauphin) region, Southeast Madagascar. Porter P. Lowry II et al. en *Madagascar Conservation & Development*, vol. 3, n.º 1, págs. 55-63; diciembre 2008.

Madagascar: Rio Tinto mine breaches sensitive wetland. Edward Carver en Mongabay. Publicado *online* el 9 de abril de 2019. **https://news.mongabay.com/2019/04/madagascar-rio-tinto-mine-breaches-sensitive-wetland**

EN NUESTRO ARCHIVO

Salvar la biodiversidad de Birmania. Rachel Nuwer en *IyC*, enero de 2017.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

La difusión de la obra de Cajal

Una red de fieles colegas se esforzaron por hacer llegar a la comunidad internacional los resultados del histólogo hispano

José Manuel Sánchez Ron

En la nómina de los «grandes de todos los tiempos» de la ciencia figura Santiago Ramón y Cajal (1852-1934). Su obra histológica, con la teoría neuronal a la cabeza, continúa vigente y es citada con frecuencia. Da idea de su grandeza la carta que le dirigió el 23 de marzo de 1921 el holandés Cornelius Ubbo Ariëns Kappers, director del Instituto de Investigación Neurológica de la Real Academia Holandesa de Ciencias (en francés en el original):

Estimado y gran maestro:

Su carta del 15 de marzo me ha producido una gran satisfacción, que le agradezco de todo corazón.

Le estoy agradecido, además, por haberme enviado la admirable colección de sus Trabajos.

No, no me falta ningún volumen y estoy orgulloso de que mi Instituto los haya recibido de usted mismo, el más grande neurólogo que ha existido y que probablemente jamás existirá.

Unos comienzos difíciles

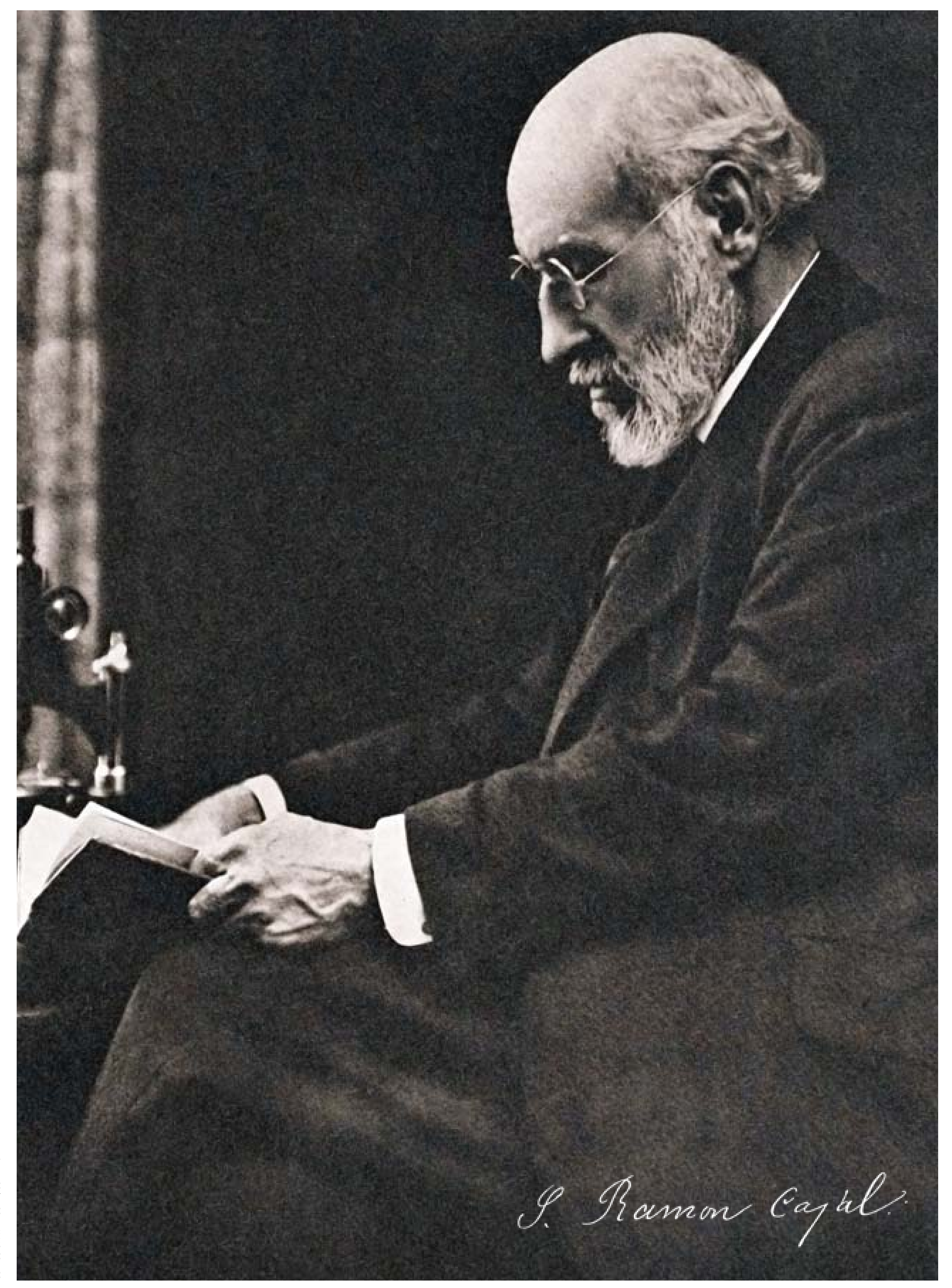
Las relaciones de Cajal con la comunidad neurocientífica internacional comenzaron realmente con su participación en el Congreso de la Sociedad Anatómica Alemana, celebrado en Berlín en octubre de 1889. Hasta entonces, se tuvo que contentar con seguir a distancia la obra de los neurocientíficos extranjeros más destacados. Sumido en la penuria económica, las obligaciones docentes y familiares, al igual que en sus propias investigaciones, él no se pudo permitir lo que algunos compatriotas suyos hicieron: marchar al extranjero para conocer personalmente a, al menos, algunos de los colegas que admiraba, y también, claro, para poder acceder a las instalaciones y materiales que poseían. Es fácil adivinar un punto de envidia, y de amargura, en una carta que escribió el 1 de enero de 1885 a uno de sus primeros discípulos, el jesuita Antonio Vicent Dolz (1837-1902), quien, desde finales de 1884, se encontraba en Lovaina para completar su formación con el citólogo Jean Baptiste Carnoy:

Mi querido P. Vicent,

Recibí la suya con gran contento, si bien no dudaba nunca que me escribiría usted y por ella veo lo satisfecho y complacido que usted está al lado de esos sabios.

Yo quisiera también imitarle a usted pero las circunstancias me lo impiden, teniendo que resignarme a ver y seguir aunque de lejos el movimiento científico de la Alemania y de la Bélgica [...]

¡Ah! ¡Quién tuviera esos magníficos objetivos a que Fle[m]ming, Strassburger y Carnoy deben sus descubrimientos! ¡Quién pudiera poseer un Seibert 1/6 o un Zeiss 1/18! Aquí desgraciadamente las facultades no tienen material y, aunque yo me empeñara en


S. Ramon Cajal.

pedir uno de esos objetivos, no me lo permitiría el decano por falta de fondos. Mucho envidio más aún esa riqueza de medios técnicos de que Vs. gozan, con la que se hace cuanto se quiere. Yo tengo que resignarme con un objetivo 8 de inmersión Verick y este gracias a que es de mi propiedad, que por la facultad no tendría más que un 5 o un 6 Nachet.

El microscopio Verick al que alude se lo había comprado Cajal en 1877, después de cursar las asignaturas del doctorado con Maestre de San Juan. Aquel mismo año, sin embargo, se hizo con un Zeiss, regalo de la Diputación de Zaragoza en agradecimiento al informe que había preparado sobre la epidemia de cólera y las campañas de vacunación emprendidas por Jaume Ferrán. «Al recibir aquel impensado obsequio», escribió en sus *Recuerdos*, «no cabía en mi de satisfacción y alegría. Al lado de tan espléndido Statif, con profusión de objetivos, entre otros el famoso 1,18 de inmersión homogénea, última palabra entonces de la técnica amplificante, mi pobre microscopio Verick parecía desvencijado cerrojo. Me complazco en reconocer que, gracias a tan espiritual agasajo, la culta corporación aragonesa cooperó eficacísimamente a mi futura labor científica, pues me equiparó técnicamente con los micrógrafos extranjeros mejor instalados, permitiéndome abordar, sin recelos y con la debida eficiencia, los delicados problemas de la estructura de las células y del mecanismo de su multiplicación.»

El congreso de Berlín

En octubre de 1889, pagándose el viaje con su propio dinero, Cajal viajó a Berlín para participar en el Congreso de la Sociedad Anatómica Alemana y presentar allí los resultados de sus investigaciones microscópicas sobre la estructura neuronal del sistema nervioso. Aquel suceso fue decisivo en su carrera. Albert Kölliker (1817-1905), el histólogo más notable de su época, catedrático de anatomía humana y director de los Institutos Anatómicos de la Universidad de Wurzburgo, fue el primero en aceptar sus hallazgos. Además, estaban presentes allí científicos de la talla y prestigio de Gustav Retzius, Wilhelm His, Wilhelm Waldeyer, Gustav Schwalbe y Karl Bardeleben.

Después del congreso, Kölliker continuó mostrando gran interés por los resultados que iba obteniendo don Santiago. Así lo muestra la carta que le escribió desde Wurzburgo el 29 de mayo de 1893:

Mi querido amigo:

En primer lugar, le expreso mi más vivo agradecimiento por el envío de su grande y bella obra sobre la retina [se debe referir al artículo, «La rétine des vertebrés», que Cajal publicó en 1892 en La Cellule*], que hace innecesarias otras observaciones. Le quedaré muy agradecido si me envía algunas de sus preparaciones, que muestren los aspectos principales. Le devolveré estas preparaciones, ya que no quiero privarlo de sus materiales de estudio.*

En cuanto al trabajo sobre el asta de Ammon que me anuncia [debe de ser «Estructura del asta de Ammon y fascia dentata», que Cajal publicó en 1893 en Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*], estoy dispuesto a traducirlo del español al alemán, ya que he aprendido bastante bien su idioma, por la necesidad de estudiar sus memorias.*

Solamente le ruego que encargue copiar su manuscrito a una persona que tenga una letra clara, porque me resulta bastante difícil leer la suya. Estaré en Wurzburgo hasta los primeros días del mes de agosto y me haría falta tener antes su manuscrito.

Kölliker cumplió su promesa y la traducción del artículo de Cajal apareció publicada («Beiträge zur feinere Anatomie des Grossen Hirns. I. Über die feinere Struktur des Ammonshornes») en *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie* (1893).

Reconocimiento internacional

Las noticias del reconocimiento que los trabajos de Cajal recibieron en Berlín se difundieron pronto en la comunidad científica. El 11 de enero de 1890, Mihály Lenhossék, entonces disector y profesor asociado en el Instituto Anatómico de la Universidad de Basilea, escribía a su colega español una carta que ayuda a comprender los obstáculos con los que este se había encontrado hasta entonces:

Los descubrimientos innovadores que recientemente viene usted publicando sin interrupción me han llenado de admiración hacia su talento, tanto por el hallazgo de hechos nuevos como por representarlos gráficamente de modo perfecto. Considero sus hallazgos las aportaciones más importantes que conozco desde hace décadas en el terreno de la anatomía microscópica. Esta admiración la comparten los señores His y Kölliker, con quienes he tenido largas conversaciones aquí en Basilea durante los meses de octubre y noviembre, y también otros colegas. Debo decir cuánto lamento no haber comprendido todo el significado de sus descubrimientos enseguida, cuando usted hace aproximadamente dos años tuvo la amabilidad de enviarme su trabajo sobre la médula, y haberme expresado tan escépticamente acerca de ellos hasta hace menos de un año; espero que no tenga usted en cuenta mi escepticismo. Ha sido una buena lección para que en mi futura actividad científica me abstenga de opinar sobre datos de contenido factual sin haberlos comprobado antes.

Claro que tampoco era siempre fácil reproducir los resultados de Cajal. En una carta que le escribió el 9 de diciembre de 1890 Arthur van Gehuchten, profesor de Anatomía de Lovaina, señalaba este punto:

Distinguido y muy sabio colega:

Lleno de admiración por los bellos resultados que usted ha conseguido y por los espléndidos descubrimientos que ha hecho en la cuestión tan difícil, tan oscura y, sin embargo, tan importante de la estructura microscópica del sistema nervioso central, he intentado ya muchas veces hacer una serie de preparaciones demostrativas, que podría utilizar en mis lecciones sobre el sistema nervioso del hombre. Sin embargo, no sé cómo explicarle que una verdadera mala suerte me persigue y no consigo nunca resultados satisfactorios.

He aplicado su método a médulas de embriones de pollo y a médulas de animales recién nacidos y apenas si consigo aquí y

allá una célula nerviosa coloreada o algunas fibras que muestran una o dos colaterales.

Le quedaría muy agradecido, distinguido colega, si me diera personalmente algunas indicaciones acerca de la forma en que usted trabaja, e incluso me permito preguntarle si, entre las numerosas preparaciones que usted ha debido hacer para conseguir sus importantes descubrimientos, no tendría por ahí algunas sobrantes que quisiera fueran de utilidad para sus colegas con el máximo interés por el tema.

El propio Cajal se daba perfecta cuenta de la dificultad asociada a sus investigaciones, no solo por cuestiones de habilidad técnica sino por la complejidad de la materia sobre la que trabajaba. A Gustav Retzius, al que volveré más adelante, le confesaba el 28 de enero de 1900:

La estructura cerebral humana es de una complicación enorme, mucho más grande de lo que el examen del cerebro de los mamíferos nos había hecho presumir. Y lo más grave de todo es que el cerebro adulto no permite teñir ninguna arborización nerviosa terminal (el cromato de plata o el método de Cox impregnan solo dendritas y axones, no ramas nerviosas terminales). Aun en el niño de un mes es raro hallar arborizaciones procedentes de fibras de la sustancia blanca. No hay pues más remedio que combinar los resultados obtenidos en fetos (donde se ven particularmente los plexos sensoriales) con los logrados en el niño y en el adulto, aunque se corre el riesgo de tomar por definitivas no pocas disposiciones que deben cambiar mucho con la salud.

Otro de los que se esforzaron en difundir los trabajos de Cajal fue el suizo Wilhelm His, discípulo de Rudolf Virchow y de Kölliker, al que Lenhossék mencionaba en su carta. His era catedrático de anatomía en la Universidad de Leipzig desde 1872 (también era director de la revista *Archiv für Anatomie und Entwickelungsgeschichte*, la sección anatómica del *Archiv für Anatomie und Physiologie*). El 14 de agosto de 1890, His escribía a Cajal:

Distinguido colega:

De regreso del congreso de Berlín desde hace días, he venido a pasar mis vacaciones a Suiza y aprovecho el primer momento libre para informarle brevemente sobre la sección anatómica del Congreso [Internacional de Medicina]. He mostrado sus bellas preparaciones en el Instituto Anatómico, sobre todo las divisiones de las fibras sensoriales y sus colaterales, las células de la sustancia gris, las células epiteliales de la médula y las células bipolares de los ganglios raquídeos. En mi comunicación sobre la histogénesis de los elementos nerviosos y sus relaciones mutuas he tenido ocasión de referirme varias veces a sus bellos descubrimientos, así como al del Sr. Golgi. Espero poder enviarle dentro de unas semanas un ejemplar de mi comunicación.

En general, se ha lamentado mucho su ausencia. Ha habido una sección muy brillante. Los señores Kölliker y Golgi han figurado entre nuestros presidentes y la discusión sobre el sistema nervioso ha estado en parte animada.

His también contribuyó a difundir los resultados de Cajal a través de su privilegiada relación con el *Archiv für Anatomie und Physiologie*. Así, el 25 de febrero de 1893 se dirigía a su colega español agradeciéndole «su nueva publicación sobre el sistema nervioso» [se trataba de «El nuevo concepto de la histología de los centros nerviosos», conferencias pronunciadas en la Academia y Laboratorio de Ciencias Médicas de Cataluña y publicadas en la *Revista de Ciencias Médicas de Barcelona* en 1892], y haciéndole la siguiente proposición:

Desde que tengo la satisfacción de conocer sus trabajos histológicos, que han hecho progresar tanto nuestros conocimientos del sistema nervioso, lamento que dichos trabajos solamente sean conocidos en el ambiente alemán a través de las citas ofrecidas por los señores Kölliker, Waldeyer y otros.

Las notas que usted ha publicado en el Anatomischer Anzeiger *no han podido dar más que una idea incompleta de sus trabajos. Opino, por tanto, que sería muy favorable para la ciencia y para usted mismo si publicara en alemán una memoria semejante al «Nuevo concepto» que acaba de editar.*

Si le parece bien esta idea, me encargaría de corregir la traducción de su memoria y de que se imprimiera en el Archiv für Anatomie und Physiologie (anat. Abt.)*, del que soy redactor. Le propongo traducir el «Nuevo concepto» tal como pienso, aunque quizá prefiera usted incluir algunos cambios, dando mayor extensión a una u otra de sus exposiciones, añadiendo datos más recientes. En cuanto a las figuras, podemos encargar su copia aquí, bien a partir de sus dibujos originales o a partir de los ejemplares de su «concepto».*

Cajal aceptó la propuesta y envió a His su manuscrito, que este hizo que tradujeran, publicándose el mismo año [«Neue Darstellung vom histologischen Bau des Centralnervensystems», *Archiv für Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Supplementband*, 1893]. Lejos estaban ya, como vemos, los tiempos en los que Ramón y Cajal tenía que pagar de su propio bolsillo las publicaciones y enviárselas a científicos extranjeros con la esperanza de que estos reparasen en ellas. Ahora contaba con una red, cada vez más extensa, de fieles colegas que se esforzaban por difundir en la comunidad científica internacional (principalmente en la germano parlante) los resultados del histólogo hispano.

Cajal y Retzius

Otra conexión importante fue la del sueco Gustav Magnus Retzius, una figura destacada en el dominio científico (realizó contribuciones notables a la embriología, fisiología y anatomía descriptiva del sistema nervioso), a quien Cajal conoció, como apunté, en el Congreso Anatómico de Berlín de 1889. Catedrático de anatomía en el Real Instituto Médico-Quirúrgico Carolino (más tarde Instituto Karolinska), Retzius fue, junto con Kölliker, uno de los primeros conversos a la «causa cajaliana». Entre la correspondencia que ambos intercambiaron se hallan cartas muy

interesantes. Así, el 25 de junio de 1891, Retzius se dirigía a Cajal desde Estocolmo (le escribía en alemán, mientras que la mayor parte de los científicos citados hasta ahora lo hacían en francés):

Distinguido colega,

Muchas gracias por su amable carta y los interesantes envíos. Cada nuevo trabajo suyo nos ofrece luz en grandes cuestiones oscuras. Como yo también me ocupo de investigaciones en el terreno del sistema nervioso, sus trabajos me interesan muy especialmente. Ya he informado a menudo en las sociedades y academias científicas de aquí sobre sus descubrimientos y le he propuesto como miembro de nuestra Asociación de Médicos. Espero que reciba pronto el diploma [...]

Espero, distinguido colega, poder iniciar una relación más estrecha y alguna vez verlo entre nosotros en Suecia [¿una alusión, tal vez, a que podría recibir el Premio Nobel de Medicina (que obtuvo en 1906)?].

El 16 de diciembre de 1894, Retzius informaba a Cajal:

Distinguido colega:

Acabo de recibir dos trabajos suyos extraordinariamente interesantes sobre los ganglios cerebrales, que le agradezco cordialmente [«Estructura del ganglio de la habénula de los mamíferos», Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, 1894; «Algunas contribuciones al conocimiento de los ganglios del encéfalo»,* Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, 1894].*

Al mismo tiempo le comunico que me he permitido dedicarle el sexto volumen de mis Biologische Untersuchungen *[«Investigaciones Biológicas», 1894], como testimonio de mi profundo reconocimiento de sus grandes servicios en el terreno de la neurología. El volumen en cuestión está ya terminado y se lo enviaré dentro de algunos días.*

NOTAS AUTÓGRAFAS de Cajal sobre sus críticas a Golgi.

Desde Madrid, el 28 de diciembre, Cajal agradecía el honor que Retzius le hacía:

Agradezco en el alma la distinción que usted me hace con dedicarme el 6.º tomo de sus monumentales y admirables Biologische Untersuchungen*, asociando mi humilde nombre al de usted por tantos títulos ilustre y autorizado en las ciencias anatómicas. La edad, lejos de hacerle cejar en sus empeños, le presta a usted nuevas fuerzas para los trabajos de laboratorio; de tal modo que si continúa usted así durante algunos años sus obras vendrán a formar una verdadera biblioteca de anatomía e histología comparadas.*

Yo trabajo ahora en la estructura del tálamo óptico y tubérculos cuadrigéminos. He recogido ya algunos datos, pero necesito mucho más tiempo de investigación para finalizar mis estudios, que formarán una monografía bastante voluminosa y con algunas láminas.

Al igual que Kölliker, Retzius se esforzaba por aprender español para leer a Cajal, como se comprueba en la carta que le escribió el 14 de mayo de 1896:

Querido colega y amigo:

Acabo de recibir el volumen I de la Revista Trimestral Micrográfica*, que me ha enviado y que agradezco cordialmente. Con esta nueva publicación veo que ha iniciado usted la edición de una nueva revista. Es una gran empresa con la que sin duda piensa dar un nuevo impulso a la ciencia española. Ha hecho usted otro gran servicio a su patria, por el que le felicito cordialmente.*

A nosotros, pobres extranjeros, nos plantea una cierta dificultad: poder leer correctamente el idioma español. Conociendo las lenguas latina y francesa que estudiamos en la escuela, no nos resulta imposible entender y estudiar también la española. Hace tiempo compré un diccionario español para leer sus trabajos. De vez en cuando se tropieza con dificultades, pero no son insuperables.

Oposición a la teoría neuronal

Otra carta interesante es la que Retzius envió a Cajal el 31 de diciembre de 1898, y ello por lo que señalaba sobre ciertos rechazos que se estaban produciendo a la teoría neuronal:

CORTESÍA DEL AUTOR

Me ha dicho Von Lenhossék que los neurólogos alemanes, con [Franz] Nissl a la cabeza, han iniciado una batalla contra la nueva teoría nerviosa, la llamada teoría de la neurona, de cuya formulación responsabilizamos a usted por encima de todos. El señor Nissl se apoya en Apáthy y Bethe. Sin embargo, esto es totalmente inadecuado. Apáthy ha comprobado haces fibrilares claros en las células ganglionares de los vertebrados y Bethe los ha podido imitar. Las demás teorías y especulaciones de Apáthy y Bethe no se basan, sin embargo, en hechos reales sino que, en su mayor parte, están sacadas del aire. Las fibrillas celulares pueden conciliarse muy bien con las experiencias que se han realizado con el método de Golgi.

Es muy extraño que histólogos que no han trabajado con el método de Golgi pretendan acabar con los grandes e innovadores hallazgos que se han conseguido con él. Ahora es necesario defender la admirable teoría nerviosa de tales ataques. Lenhossék se prepara para ello. No obstante, antes que nadie debe también defender la fortaleza usted, que fue la cabeza de la formulación de la teoría.

Entre los que se oponían a la teoría neuronal de Cajal a la que se refería Retzius, figuró Camillo Golgi (con quien Cajal compartió el Nobel), el responsable de la introducción del método de coloración argéntica para teñir células nerviosas. Pero la historia de esta batalla (de la que resultó victorioso el científico español) es demasiado larga para poder intentar siquiera esbozarla aquí. Simplemente diré que Cajal la tuvo siempre muy presente. De hecho, uno de sus últimos trabajos (fue publicado en 1933 bajo el título «¿Neuronismo o reticularismo? Las pruebas objetivas de la unidad anatómica de las células nerviosas») estuvo dedicado a, como él mismo señaló en la introducción: «Una exposición sucinta de las observaciones contrarias a la concepción de Apáthy, Bethe y Held. Mi propósito es describir brevemente lo que yo he visto en cincuenta años de trabajo y lo que cualquier observador, exento de prejuicios de escuela, puede fácilmente comprobar, no en tal o cual célula nerviosa, acaso mal fijada o de tipo anormal, sino en millones de neuronas vigorosamente coloreadas por diversos métodos de impregnación». IyC

PARA SABER MÁS

Recuerdos de mi vida. Santiago Ramón y Cajal. 3.ª edición. Imprenta de Juan Pueyo, Madrid, 1923.
Santiago Ramón y Cajal. José María López Piñero. Publicacions de la Universitat de Valencia, 2006.
Epistolario. Juan Fernández Santarén, Santiago Ramón y Cajal. La Esfera de los Libros, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Hace 100 años. Efemérides relativa a Santiago Ramón y Cajal. J. M. López Piñero en *IyC*, noviembre de 1988.
Cajal y la estructura histológica del sistema nervioso. J. M. López Piñero en *IyC*, febrero de 1993.
El punto de partida de la obra neurohistológica de Cajal. J. M. López Piñero en *MyC* n.º 1, 2002.

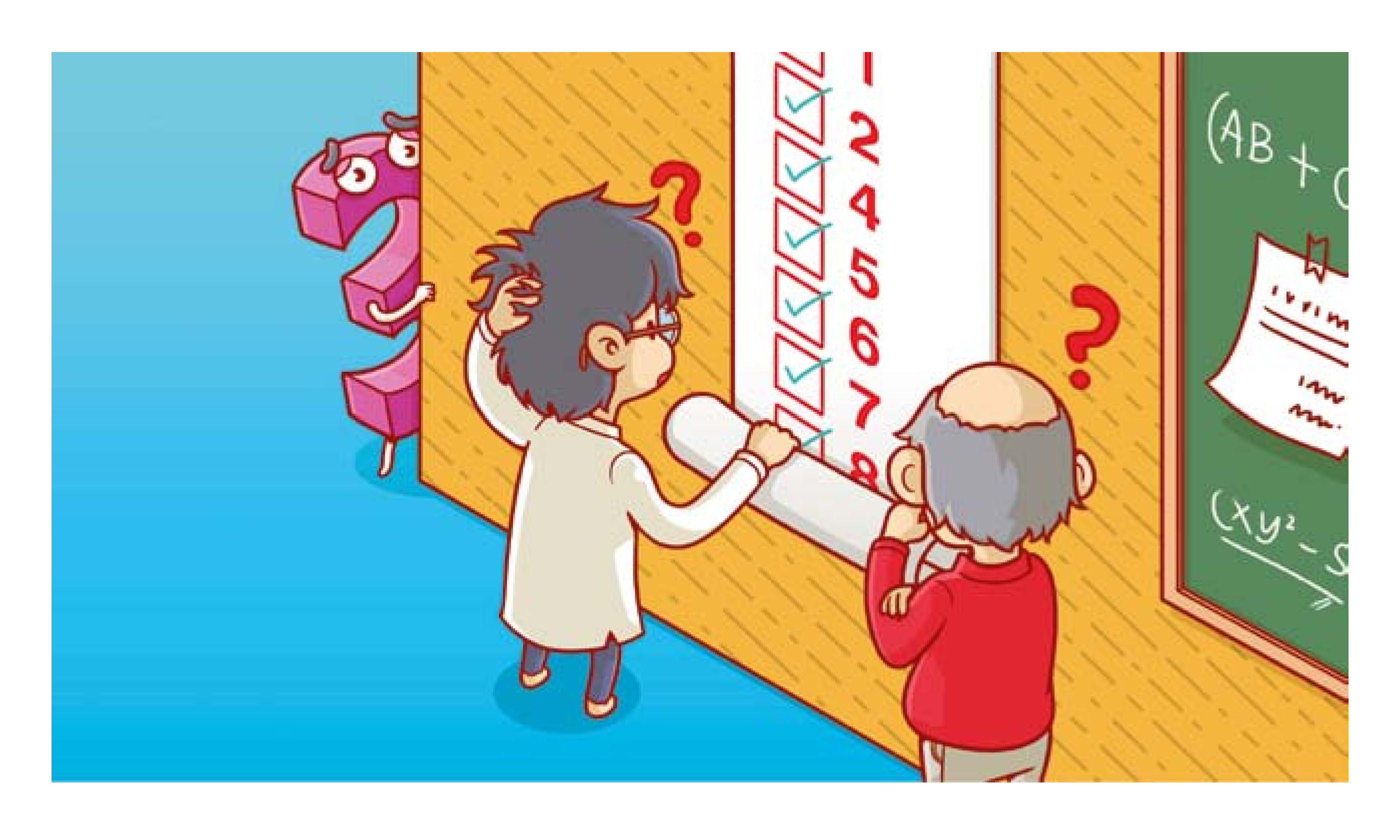
por Patrick Honner

Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.



La intersección entre la demostración, los indicios y la imaginación

En matemáticas, donde las demostraciones lo son todo, los indicios también importan. Pero estos dependen de un modelo, y la modelización conlleva sus riesgos. Así que ¿cuántos indicios bastan?



BIG MOUTH PARA *QUANTA MAGAZINE*

¿Sería capaz de encontrar el siguiente número de esta sucesión?

1, 2, 4, 8 ...

En caso de que necesite más información para decidirse, aquí tiene otro número:

1, 2, 4, 8, 16 ...

El siguiente elemento tiene que ser 32, ¿verdad? La pauta parece clara: para encontrar cada término de la sucesión, multiplicamos el anterior por dos. Así obtenemos $1 \times 2 = 2$, $2 \times 2 = 4$, $4 \times 2 = 8$ y $8 \times 2 = 16$. Por lo tanto, el siguiente número debería ser $16 \times 2 = 32$. ¿Qué más indicios necesitamos?

Aunque es perfectamente razonable pensar que la respuesta correcta es 32, resulta que no es así. Consideremos la sucesión representada en la figura ❶.

Cada elemento se obtiene contando el número de regiones en que se divide un círculo al unir una serie de puntos situados sobre su circunferencia. Con un punto, se obtiene una única región (el propio círculo); con dos puntos, dos regiones; tres puntos producen cuatro regiones, mientras que cuatro y cinco puntos dan lugar a ocho y dieciséis regiones, respectivamente. Eso nos da la sucesión

1, 2, 4, 8, 16 ...

Pero ¿cuántas regiones se forman al unir seis puntos situados sobre una circunferencia?

Casi todo el mundo que se encuentra por primera vez con este problema piensa que la respuesta es 32. Pero no lo es:

❶

Puntos = 1
Regiones = 1

Puntos = 2
Regiones = 2

Puntos = 3
Regiones = 4

Puntos = 4
Regiones = 8

Puntos = 5
Regiones = 16

en realidad el círculo se divide en 31 regiones. Puede contarlas usted mismo en la figura ❷. Y cuéntelas de nuevo para asegurarse.

Por supuesto, hay problemas que producen la sucesión 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 y así sucesivamente, multiplicando cada término por dos para obtener el siguiente. Pero también hay otros, como el número máximo de regiones que se forman al unir puntos situados sobre una circunferencia, que resultan en la sucesión 1, 2, 4, 8, 16, 31, 57, 99, etc. Al ver los términos 1, 2, 4, 8, 16, podemos pensar que todos los indicios apuntan a que el siguiente elemento es 32. Pero bien podría tratarse de otro número.

Las matemáticas a menudo desafían nuestras expectativas y nos obligan a usar la imaginación. Esa es una de las razones por las que los matemáticos se afanan por hallar demostraciones y no meros indicios. Son las demostraciones las que establecen la verdad matemática. Todos los indicios disponibles pueden sugerir un cierto resultado, pero sin una demostración no podemos estar seguros.

A pesar de ello, los indicios son importantes y útiles en matemáticas. Con frecuencia, antes de demostrar algo jugamos un poco, exploramos, consideramos ejemplos y reunimos datos. Examinamos y sopesamos los indicios y decidimos cuál es el siguiente paso. Los resultados de este proceso dan forma a nuestras opiniones, indicándonos que deberíamos tratar de demostrar ciertos teoremas y de refutar otros.

Un ejemplo donde los indicios guían nuestro pensamiento matemático tanto como la demostración es la conjetura de los números primos gemelos. Estos son pares de números primos que difieren en dos unidades: por ejemplo, 3 y 5, 11 y 13, o 101 y 103. La conjetura de los primos gemelos afirma que no existe un par de primos gemelos que sea mayor que todos los demás. Es decir, que estos pares siguen apareciendo a medida que nos movemos hacia el infinito en la recta numérica.

Hablamos de la conjetura de los primos gemelos (y no del teorema de los primos gemelos) porque nadie ha sido capaz de demostrarla, a pesar de que es uno de los problemas más famosos en teoría de números. Pero existe la creencia generalizada de que es cierta, dada la gran cantidad de indicios que la apoyan.

Por ejemplo, a medida que buscamos números primos cada vez más grandes seguimos encontrando pares de primos gemelos: en el mayor par que se conoce, cada número tiene cerca de 400.000 dígitos. Además, se han demostrado algunos resultados similares a la conjetura de los primos gemelos. En 2013, Yitang Zhang sorprendió al mundo matemático al probar que hay infinitos pares de primos que difieren en 70 millones o menos. Este resultado dio origen a un proyecto *polymath* (esfuerzos colaborativos en los que trabajan matemáticos de todo el mundo), gracias al cual la cota se ha reducido de 70 millones a 246. Todavía no se ha demostrado que haya infinitos pares de primos que difieran en dos unidades —la conjetura de los primos gemelos—, pero 2 está mucho más cerca de 246 que de infinito.

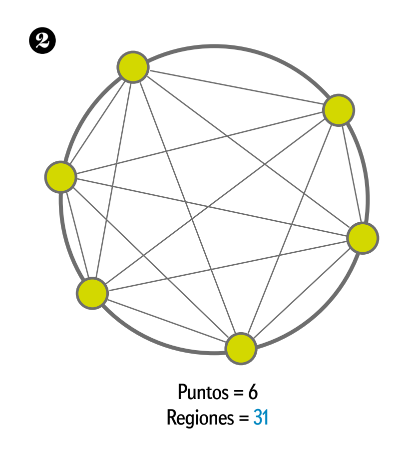
Por estas y otras razones, creer que la conjetura de los primos gemelos es correcta, pese a que no haya sido demostrada, no es demasiado controvertido. Pero hay otras áreas de las matemáticas en las que el uso de los indicios para conformar una opinión resulta más cuestionable.

En el estudio de las curvas elípticas, el rango de una curva es, por así decirlo, una medida numérica de lo complejas que son sus soluciones. Durante muchos años, hubo consenso en que los rangos de las curvas elípticas no estaban acotados superiormente, es decir, en que el rango de una curva (o la complejidad de sus soluciones) podía ser arbitrariamente grande.

Pero un estudio reciente ha llevado a algunos matemáticos a pensar que, después de todo, los rangos podrían estar acotados. El trabajo presenta indicios que apuntan a que solo hay un número finito de curvas elípticas con rango mayor que 21.

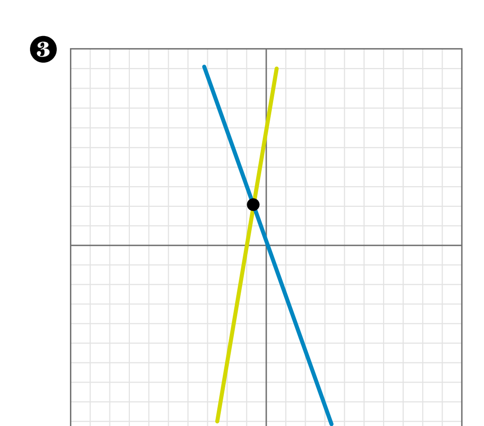
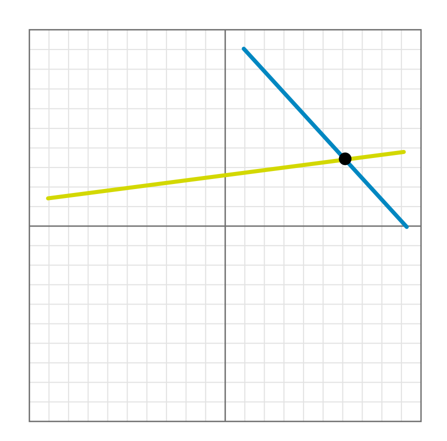
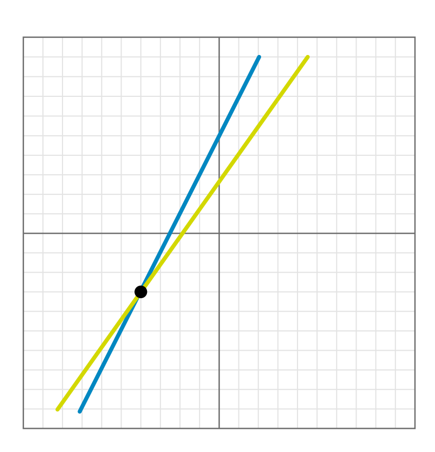
Aun así, hay que ser cautos. Los indicios son convincentes, pero no provienen del mundo de las curvas elípticas, sino del

❷



Puntos = 6
Regiones = 31

❸

de las matrices que los investigadores emplearon para modelizarlas. Los modelos matemáticos se usan en todos los ámbitos de la ciencia y pueden servir incluso para estudiar las propias matemáticas. Son herramientas increíblemente potentes que nos permiten pasar de un problema que no entendemos completamente a otro que controlamos mejor.

Pero usar modelos es algo muy delicado. No podemos estar seguros de si el comportamiento de nuestro modelo es lo bastante parecido al del sistema que queremos entender como para extraer conclusiones válidas. Ni tampoco de si el modelo reproduce de forma suficientemente precisa los aspectos realmente importantes de dicho sistema. Por eso puede ser difícil determinar si los indicios obtenidos a partir del modelo nos dicen algo acerca del problema original. Para entender mejor estas dificultades, emplearemos un modelo simple de una conjetura sencilla.

Imaginemos que queremos analizar la siguiente afirmación: dos líneas rectas cualesquiera, o bien se cortan, o bien son paralelas.

Por «cortarse» entendemos que las líneas comparten un punto, mientras que «paralelas» implica que ambas se extienden en la misma dirección sin cortarse (hay diferentes maneras de definir el paralelismo, pero adoptaremos esta por simplicidad).

Para investigar nuestra afirmación, vamos a establecer un modelo. Expresaremos las rectas en forma explícita, es decir, asumiremos que cada una puede representarse mediante una ecuación del tipo

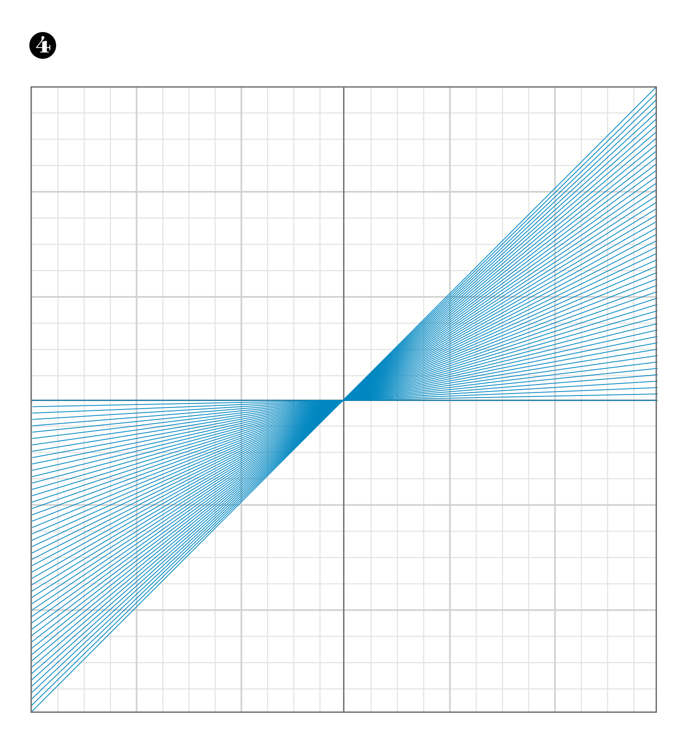
$$y = mx + b\,,$$

donde m es la pendiente de la recta (esencialmente su inclinación) y b la ordenada en el origen (la altura a la que corta al eje vertical).

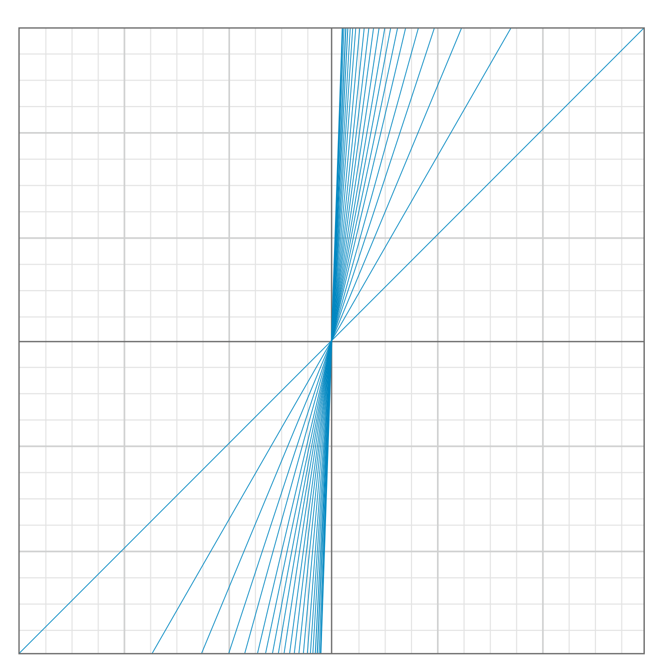
Esta modelización de las rectas nos ofrece una manera práctica de experimentar con ellas. Podemos generar una recta arbitraria eligiendo aleatoriamente un par de números, m y b. De esta forma, podemos coger un par de rectas al azar y comprobar qué pasa: ¿se cortan? ¿Apuntan en la misma dirección? ¿O sucede alguna otra cosa?

La figura ❸ muestra algunos posibles resultados del experimento. En todas las gráficas, las dos rectas escogidas al azar se cortan. Si repitiésemos el experimento 1000 veces (o 10.000 veces, o un millón

❹



❺



de veces), siempre encontraríamos que las rectas o se cortan o son paralelas. (De hecho, seguramente todos los pares de rectas se cortarían, ya que es complicado elegir al azar exactamente la misma pendiente para ambas rectas.)

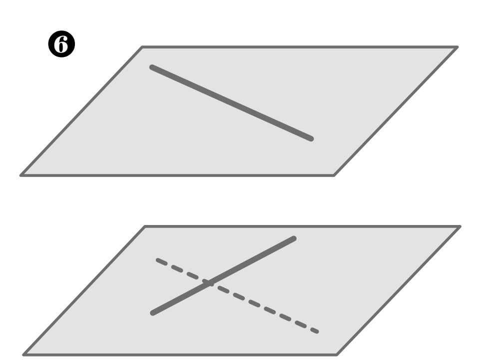
Por lo tanto, tras analizar un millón de ejemplos, concluiríamos que la conjetura probablemente es cierta. Todos los indicios apoyan de manera abrumadora la afirmación de que cualquier par de rectas, o bien se cortan, o bien son paralelas.

Pero los indicios dependen del modelo, y la modelización conlleva sus riesgos. Veamos cuáles hemos corrido.

Un primer problema es que ciertas rectas son más probables de generar que otras. El gráfico ❹ muestra 50 rectas con $b = 0$ y $0 \leq m \leq 1$, mientras que en la figura ❺ se representan 50 líneas con $b = 0$ y $m \geq 1$.

Vemos que las rectas con pendientes entre 0 y 1 cubren una cuarta parte del plano, mientras que aquellas con pendientes mayores que 1 recubren otro cuarto. Pero parece mucho más probable escoger al azar un número mayor que 1 que uno entre 0 y 1. Por lo tanto, es mucho más probable seleccionar una recta de la segunda región que una de la primera. Eso quiere decir que las rectas con pendientes entre 0 y 1 estarán infrarrepresentadas en nuestro modelo. Si ocurriera algo extraño con ellas, seguramente no podríamos detectarlo.

Un análisis más detallado del segundo gráfico revela otro problema. A medida que m crece, las líneas se vuelven más empinadas, hasta llegar a la vertical. Pero ¿cuál es la pendiente de esta última? No está definida, ya que no podemos escoger ningún número m que genere una línea vertical. Eso implica que las rectas verticales no existen en nuestro modelo, por lo que seremos incapaces de experimentar con ellas. Hemos excluido esa posibilidad desde el principio, antes incluso de comenzar a reunir indicios.



Eso nos lleva al problema más grave de nuestro modelo. Cualquiera acostumbrado a pensar en tres dimensiones se habrá dado cuenta enseguida de que nuestra conjetura es falsa: las rectas no tienen por qué ser paralelas o cortarse. Imaginemos, por ejemplo, dos pasillos que discurren en distintas direcciones en dos plantas de un mismo edificio, como se ilustra en la figura ❻. Este es un ejemplo de dos rectas que se cruzan y que, por lo tanto, ni son paralelas ni se cortan.

La característica esencial de dos líneas que se cruzan es que tienen que estar en planos distintos. Pero, como nuestro modelo identifica cada recta con una ecuación $y = mx + b$, estamos suponiendo automáticamente que todas ellas se encuentran en el mismo plano. Así, nuestro modelo solo generará indicios que apoyen nuestra conjetura, ya que, si dos rectas están en el mismo plano, es cierto que deben ser paralelas o cortarse. Nunca obtendremos indicios que sugieran otra posibilidad: las rectas que se cruzan no existen en nuestro modelo. Al igual que pasaba con las líneas verticales, el modelo ha excluido aquello que no hemos sido capaces de imaginar.

Este es un ejemplo muy simple que recurre a un modelo muy rudimentario y con gran cantidad de problemas, entre ellos la engorrosa cuestión de cómo escoger números aleatorios en un conjunto infinito.

Los matemáticos profesionales que estudian el rango de las curvas elípticas nunca cometerían los errores de bulto que hemos expuesto. Pero saben que deben ser cautos al trabajar con sus modelos porque, independientemente de lo útiles o interesantes que sean o de lo persuasivos que resulten los indicios obtenidos, podría haber algún aspecto de las curvas elípticas que no hayan imaginado. Y si no son capaces de imaginarlo, su modelo no puede incluirlo y los indicios no lo reflejarán.

Sea correcto o no, este nuevo modelo ha llevado a los matemáticos a pensar de manera productiva sobre las curvas elípticas. Si el modelo refleja la verdad, los resultados del mundo de las matrices podrían explicar por qué las curvas elípticas se comportan como lo hacen. En caso contrario, entender por qué no es posible modelizarlas así también podría conducir a una compresión más profunda del problema. De una manera u otra, puede que los indicios que obtengamos nos acerquen a la demostración. ■

SOLUCIONES AL PASATIEMPO «DEMUESTRE SU CULTURA MATEMÁTICA»

Juegos matemáticos, enero de 2020, pág. 92

(1) La leyenda de Sisa sobre el origen del ajedrez.
(2) La fórmula de Euler y el último teorema de Fermat.
(3) Anamorfosis (basada en una obra de Escher).
(4) Puente de Leonardo da Vinci.
(5) Triángulo de Reuleaux.
(6) Tangram.
(7) Teselaciones homogéneas construidas exclusivamente con polígonos regulares.
(8) Gauss, Newton y Euler.
(9) Da Vinci, Durero y Velázquez.
(10) Tornillo aéreo de Leonardo da Vinci.
(11) Cubo con junta doble de cola de milano.
(12) Pentominós.
(13) La curva cicloide.
(14) Máquina de Galton.
(15) Péndulo de Newton.
(16) Caleidoscopio esférico.
(17) Puzles de Sam Loyd.
(18) Los puentes de Königsberg.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

Más información sobre los proyectos colaborativos *polymath* en **http://michaelnielsen.org/polymath1**

Bounded gaps between primes. Yitang Zhang en *Annals of Mathematics*, vol. 179, n.° 3, págs. 1121-1174, mayo de 2014.

A heuristic for boundedness of ranks of elliptic curves. Jennifer Park et al. en *Journal of the European Mathematical Society*, vol. 21, n.° 9, págs. 2859-2903, mayo de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La irrazonable eficacia de las matemáticas. Marco Livio en *IyC*, noviembre de 2011.

Gödel y la verdad axiomática. Agustín Rayo en *IyC*, febrero de 2014.

¿Son reales las matemáticas? Kelsey Houston-Edwards en *IyC*, noviembre de 2019.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Cuando las copas cantan

Frotar el borde de una copa con un dedo húmedo hace que sus paredes vibren. El fenómeno produce notas muy puras que pueden aprovecharse con fines musicales

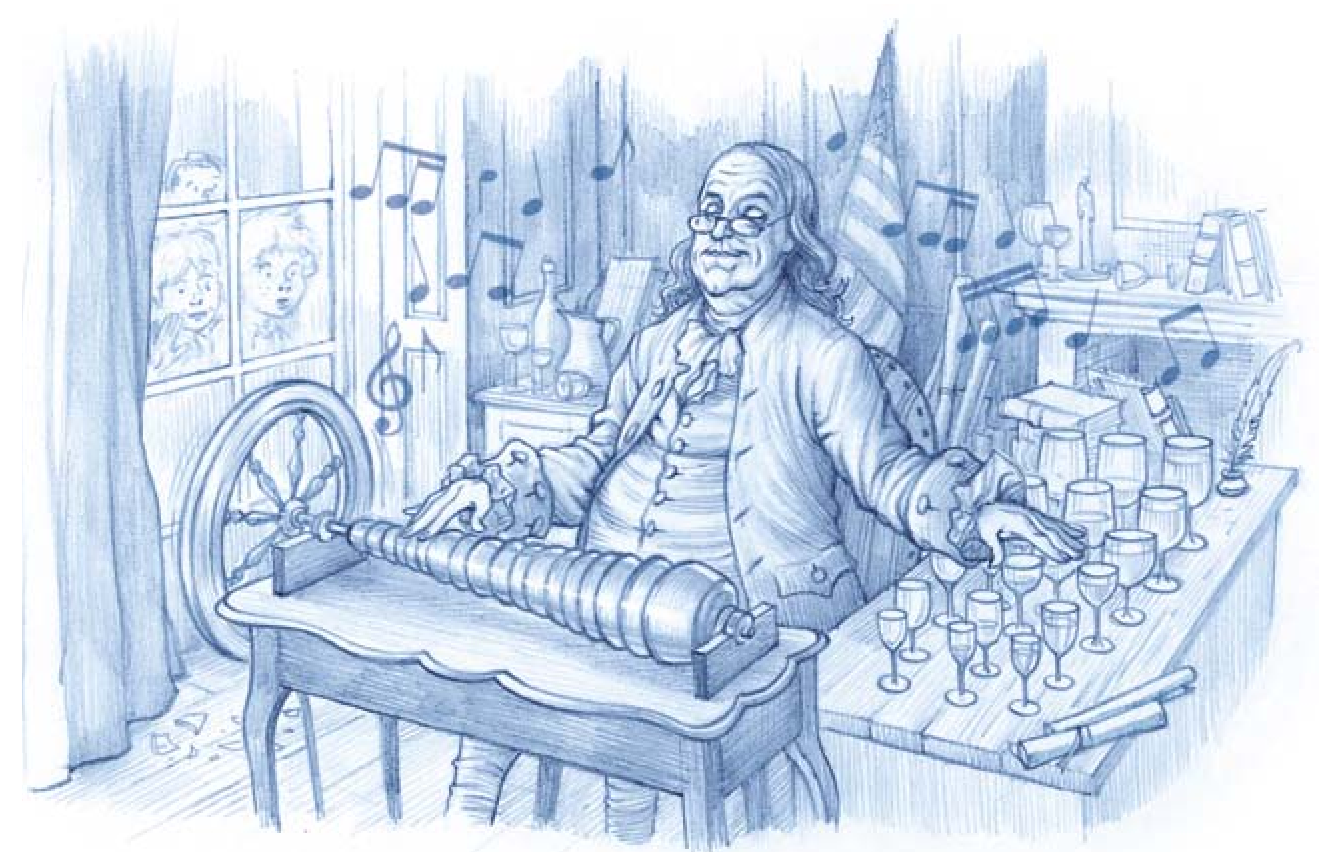
¿Quién no se ha entretenido durante alguna velada haciendo que su copa de cristal cante al pasar un dedo húmedo por el borde? El sonido resultante, ligero y delicado, posee unas incontestables cualidades musicales. De hecho, hace tiempo que los melómanos construyeron instrumentos formados por copas o tazones, y tampoco han faltado compositores que escribieran piezas para las llamadas «armónicas de cristal».

Sin embargo, cuando hablamos de sonido pensamos en una onda acústica y en vibraciones. ¿Qué es lo que vibra en este caso? ¿Qué parámetros debemos modificar para lograr notas del tono deseado? Abramos nuestros aparadores y apliquémonos a descubrir la física del canto de las copas.

Flexiones de la pared

Precisemos primero que una copa no es el tubo de una flauta de Pan. El sonido emitido no se debe a la vibración de una columna de aire, sino a la de las paredes del recipiente. A su vez, estas actúan sobre el aire circundante a modo de membranas de altavoz o láminas que vibran.

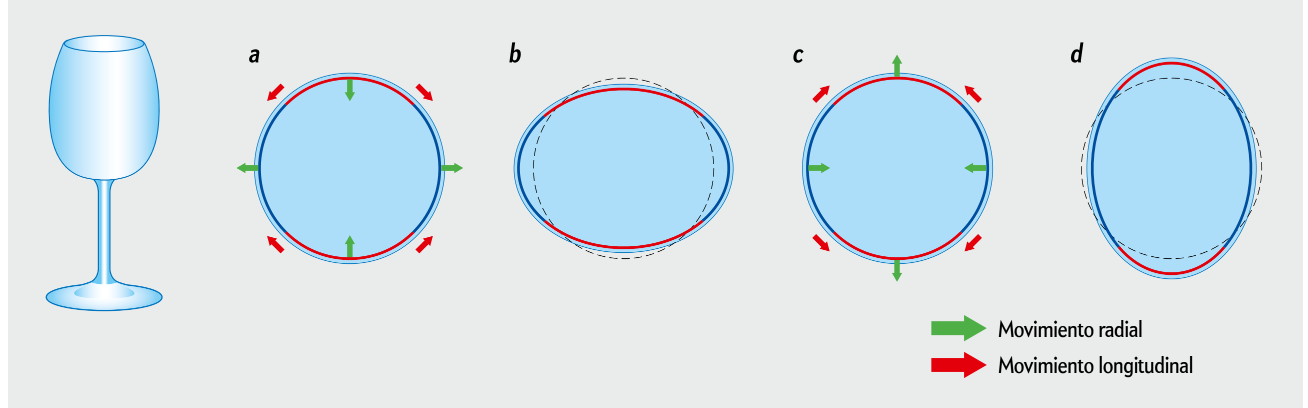
Así pues, para entender cómo vibra una copa, hagamos una primera prueba: frotemos una copa de cristal con el dedo o démosle un golpecito con una cucharilla. Al hacerlo, podremos comprobar que obtenemos unas notas que, al oído, son del mismo tono. ¿Qué nos indica eso? La cucharilla incide perpendicularmente sobre el borde de la copa (según el diámetro que pasa por el punto de impacto), mientras que el dedo se desliza de manera longi-



DOS INSTRUMENTOS DE VIDRIO: La armónica de cristal de Benjamin Franklin (*izquierda*) y un conjunto de copas de varios tamaños con distintas cantidades de agua.

FLEXIONES ELÍPTICAS

CUANDO UNA COPA CIRCULAR se frota con un dedo húmedo o se golpea con una cucharilla, el objeto comienza a vibrar y su borde se deforma periódicamente, aunque sin modificar su perímetro. Este esquema muestra cuatro instantes sucesivos del ciclo de vibración. El borde adquiere un contorno elíptico determinado por dos ejes perpendiculares. A las vibraciones radiales se suman otras en la dirección longitudinal, marcadas en los puntos que separan los arcos rojos y azules.



tudinal (a lo largo del perímetro). Dado que la nota generada es la misma, hemos de concluir que la copa vibra en esas dos direcciones a la vez.

De hecho, basta con posar un dedo muy levemente sobre la copa para que el sonido se atenúe con rapidez. Ese amortiguamiento se produce con independencia del lugar sobre el que pongamos el dedo, lo que significa que en el borde de la copa no existen «nodos» de vibración; esto es, puntos que permanezcan inmóviles. Si los hubiera, al poner el dedo sobre ellos las oscilaciones no se extinguirían (*véase el recuadro* «Flexiones elípticas»).

Ahora hagamos una segunda prueba con una taza grande provista de asa. Coloquémosla ante nosotros de tal modo que el asa quede en la posición opuesta a la nuestra, y llamemos «norte» (N) a la dirección que define la ubicación del asa. Golpeemos entonces la taza con una cucharilla en los puntos N, O, S y E. Vemos que en todos los casos obtenemos la misma nota, lo que sugiere que esos cuatro «puntos cardinales» inducen las mismas vibraciones.

Repitamos ahora el proceso, pero golpeando esta vez en los puntos NE, SE, SO o NO. En este caso observaremos que la nota generada es más aguda que la anterior. Si percutimos en cualquier otro punto, oiremos una superposición de los dos tonos.

Esto último nos revela que la taza puede vibrar de dos maneras, lo que los físicos denominan «modos de vibración». Los nodos de vibración radial de uno de los modos (aquellos puntos donde la amplitud de dicha oscilación es nula) coinciden con las crestas de vibración radial del otro (los puntos donde la amplitud es máxima). Un golpe en N excita la cresta del modo 1. Sin embargo, justo allí se encuentra uno de los nodos radiales del modo 2, por lo que este no se activa. Si golpeamos en el punto NE, nos encontraremos ante la situación inversa (*véase el recuadro* «Un asa, dos modos de vibración»).

Por supuesto, nuestro experimento no revela todos los pormenores de la física subyacente. Otra característica de interés es que los modos de vibración de la copa corresponden a deformaciones por flexión, no por compresión. En otras palabras: visto desde arriba, el borde de la copa se deforma manteniendo un perímetro constante.

En segundo lugar, para un modo de vibración dado, la deformación que sufre la circunferencia corresponde a una elipse, uno de cuyos ejes pasa por el punto de contacto con la cucharilla. Durante la vibración, el eje mayor y el menor de dicha elipse se alternan.

Por último, señalar que todas las secciones transversales de la copa se deforman de la misma manera, aunque no necesariamente con la misma amplitud. Como consecuencia, la altura de la copa apenas afecta a la nota generada.

Estas propiedades nos permiten dilucidar dos de nuestras observaciones. Por un lado, el hecho de que el perímetro se mantenga constante explica por qué los nodos de la oscilación radial vibran sin embargo longitudinalmente, siguiendo la evolución temporal del cuarto de circunferencia que los une (*véase el recuadro* «Flexiones elípticas»). De hecho, es precisamente en esos lugares donde las vibraciones longitudinales son más intensas. Por tanto, los puntos N, E, S, y O corresponden a crestas de la vibración radial y a nodos de la longitudinal, mientras que con los puntos NE, SE, SO y NO ocurre lo contrario. Y los puntos intermedios presentan ambos tipos de vibración, tal y como intuíamos tras nuestra primera prueba.

Por otra parte, entendemos por qué nuestra taza da dos notas. En el modo 1, el asa del recipiente se encuentra en una cresta de la vibración radial, mientras que en el modo 2 se sitúa en una cresta de las vibraciones longitudinales. Los cálculos muestran que la amplitud de esta última es dos veces inferior a la de la cresta radial.

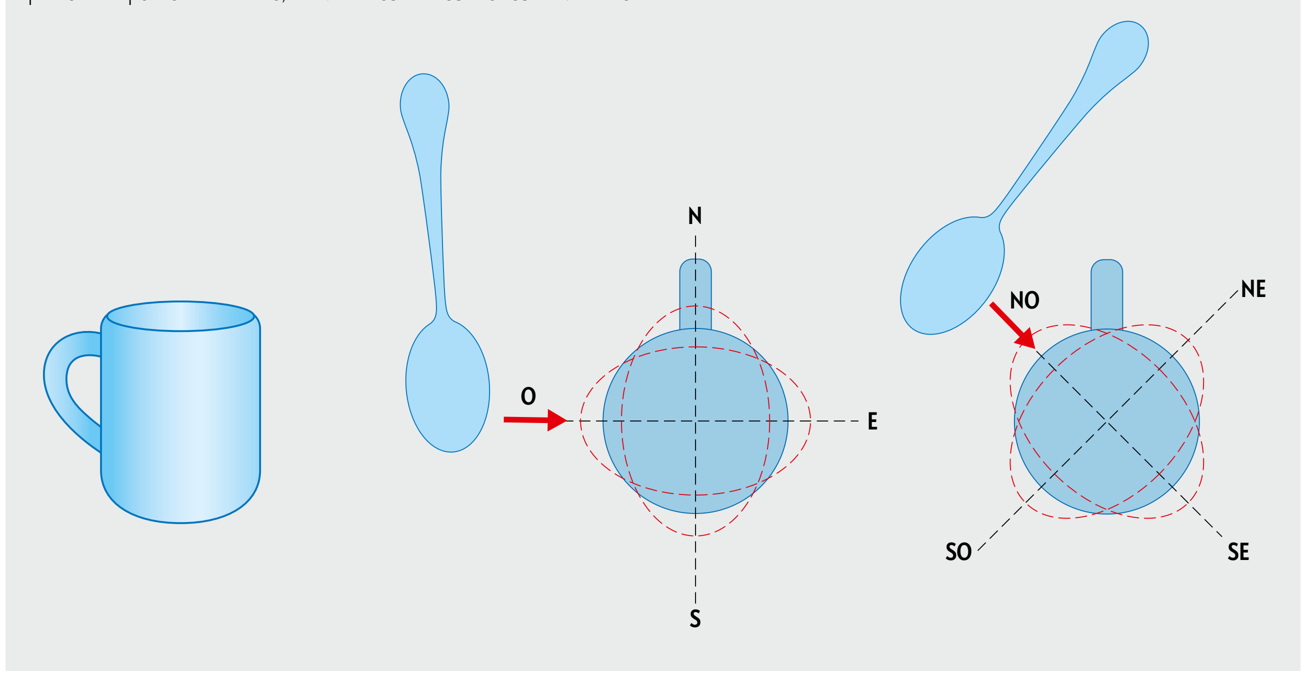
La puesta en movimiento del asa es por tanto diferente en uno y otro caso: es mayor en el modo 1, y por tanto más sensible a la masa de la empuñadura. En cambio, la fuerza de recuperación, debida a la «rigidez» de la pared, resulta idéntica en ambas situaciones. Por tanto, como en todo oscilador, cuanto mayor sea la masa, mayor será el período de las oscilaciones y más grave la nota correspondiente.

¿De qué depende la nota?

¿Qué deberíamos hacer si deseamos conseguir una escala musical completa? A

UN ASA, DOS MODOS DE VIBRACIÓN

SI CON AYUDA DE UNA CUCHARILLA percutimos en una taza con asa, el borde del recipiente comenzará a vibrar según dos modos posibles. Si golpeamos en uno de los «puntos cardinales» señalados con las letras N, O, S o E, excitaremos el modo de vibración alineado con el asa, cuyas crestas se hallan en dichos puntos. En cambio, si incidimos los puntos NE, SE, SO o NO, la localización del asa coincidirá con uno de los nodos de la vibración radial (los puntos donde la amplitud de la oscilación es nula), lo que excitará un modo distinto. Si la cucharilla percute en punto intermedio, activaremos ambos modos de vibración.



nuestra disposición tenemos tres parámetros con los que jugar: el diámetro de las copas, su espesor y su contenido.

Al aumentar el primero, crece la distancia que debe recorrer la onda de flexión durante una vuelta completa al perímetro. Ahora bien, para conseguir una onda estacionaria, la duración de una vuelta completa ha de ser igual al período de la vibración, y por tanto al inverso de la frecuencia. La teoría de la elasticidad nos dice que la velocidad de la onda de flexión varía con la raíz cuadrada de la frecuencia. De ello se deduce que la frecuencia del sonido es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro de la copa. Por tanto, cuanto mayor sea esta, más grave será su canto.

Por otro lado, si aumentamos el espesor del vidrio, la cantidad de masa en movimiento crecerá de manera proporcional. Pero también aumentará la «rigidez» de la pared, la cual sin embargo varía con el cubo del espesor; es decir, más rápido que la primera. Como resultado, la frecuencia es proporcional al espesor: cuanto más gruesa sea la copa, más aguda será la nota.

Estos dos ingredientes le bastaron al ilustre Benjamin Franklin para concebir su «armónica de cristal». En ella, un conjunto de cuencos de vidrio o de cristal con diámetros y espesores convenientemente elegidos se encajan unos dentro de otros y se hacen girar en torno a un eje, el cual se acciona mediante un pedal o un motor. Después, al instrumentista le basta con humedecerse los dedos y posarlos sobre los cuencos para interpretar composiciones concebidas ex profeso para esta «armónica», como el *Adagio y rondó para armónica de copas* de Mozart.

Si no disponemos de tal instrumento, podemos contentarnos con añadir agua o cualquier otro líquido a las piezas de nuestra cristalería. En este caso, las vibraciones de las paredes se transmitirán al líquido. Al añadir agua aumenta la masa en movimiento, por lo que cuanto más líquido contenga la copa, tanto más grave será la nota.

¿Podemos afinar más? Cuando una copa canta, la amplitud de las vibraciones es nula en el fondo del recipiente y aumenta conforme nos acercamos al borde superior. En otras palabras, el agua de la parte inferior se mueve mucho menos que la situada más arriba. Así pues, el efecto de añadir líquido es tanto más notable cuanto más llena esté la copa. Añadir la misma cantidad de agua produce un efecto mayor en una copa casi llena que en otra casi vacía. Por tanto, para conseguir las notas sucesivas de la escala introduciendo líquido en una serie de copas idénticas, habremos de añadir agua en cantidades cada vez menores para obtener intervalos musicales iguales. En este caso, lo mejor será proceder por tanteo valiéndonos de un afinador. IyC

PARA SABER MÁS

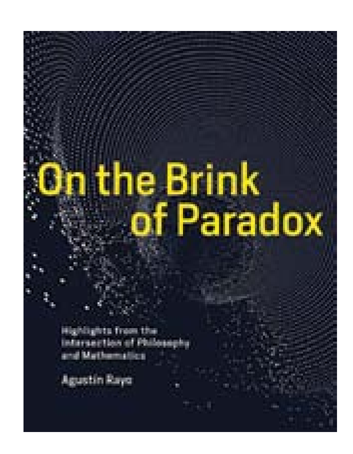
***In vino veritas:* A study of wineglass acoustics.** Anthony P. French en *American Journal of Physics*, vol. 51, págs. 688-694, agosto de 1983.

Wine glasses, bell modes, and Lord Rayleigh. Thomas D. Rossing en *The Physics Teacher*, vol. 28, págs. 582-585, diciembre de 1990.

Acoustics of the glass harmonica. Thomas D. Rossing en *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 95, págs. 1106-1111, febrero de 1994.

EN NUESTRO ARCHIVO

Instrumentos musicales de vidrio. Jean-Claude Chapuis en *IyC*, septiembre de 2000.



ON THE BRINK OF PARADOX
HIGHLIGHTS FROM THE INTERSECTION OF PHILOSOPHY AND MATHEMATICS

Agustín Rayo
MIT Press, 2019
320 págs.

Matemáticas con filosofía y filosofía con matemáticas

De Cantor a Gödel pasando por Bayes

Si usted disfrutaba, como yo, con las columnas de «Juegos matemáticos» de Agustín Rayo en *Investigación y Ciencia*, está de enhorabuena. Rayo sigue siendo profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y el éxito que tuvo un curso que impartió allí basado en parte en aquellas columnas ha acabado cristalizando en *On the brink of paradox* («Al borde de la paradoja»), editado por MIT Press el año pasado.

A pesar del título, y como ya avisa el autor, la obra no es una colección de paradojas —aunque desde luego aparecen unas cuantas—, sino una exploración de la intersección entre filosofía y matemáticas, como bien reza el subtítulo. Para entender qué quiere decir esto, déjenme que les explique la idea tomando como ejemplo la primera parte de las tres en que Rayo ha dividido la obra: «Infinito», «Decisiones, probabilidades y medidas» y «Computabilidad y el teorema de Gödel».

Rayo comienza su exposición con un clásico de la divulgación matemática: el hotel de Hilbert. Plantea así la aparente paradoja de que un subconjunto pueda tener tantos elementos como el conjunto al que pertenece, y nos cuenta cómo Cantor, a finales del siglo XIX, deshizo el entuerto usando la biyección entre conjuntos infinitos para determinar sus cardinalidades relativas. Seguidamente nos demuestra que los racionales poseen la misma cardinalidad que los naturales y que los reales poseen una cardinalidad mayor.

Hasta aquí lo que podríamos encontrar en un buen artículo de divulgación matemática, como la columna «El infinito» que Rayo escribió en diciembre de 2008 para esta revista. Ese ensayo de dos páginas acaba diciendo: «Cantor [...] probó también que un conjunto siempre tiene más subconjuntos que elementos. De esto se sigue que hay más subconjuntos de números reales que números reales, y más subconjuntos de subconjuntos de números reales que subconjuntos de números reales, y así sucesivamente. ¡Hay infinitos tamaños de infinito!». Un final que, a propósito, deja al lector con ganas de saber más.

En su libro, Rayo ofrece esa profundidad que por falta de espacio era imposible en una columna. Y lo logra de forma magistral, ofreciendo demostraciones del teorema de Cantor, definiendo la potenciación de conjuntos, el principio de la aditividad contable, los ordinales y su aritmética, y rematando todo con una discusión sobre la hipótesis del continuo. Digo que lo hace magistralmente porque, aparte de lo que nos cuenta, también nos ayuda a recorrer el camino por nosotros mismos a través de pequeños ejercicios cuyas respuestas aparecen al final de cada capítulo. De hecho, los dos primeros son la mejor exposición sobre el tema que he leído nunca.

Esta primera parte concluye con una serie de paradojas, puntuadas por dificultad e interés del 1 al 10 según la simpática escala del filósofo Mark Sainsbury, que, en su mayoría, involucran de una forma u otra el infinito. Rayo nos enganchó a algunas de ellas en columnas como «Cartas, monedas y sombreros» (febrero de 2009), «Sombreros e infinitos» (abril de 2009), «Los prisioneros y María» (agosto de 2009) o «El juego del diablo» (octubre de 2010). Ahora, el lector puede profundizar en ellas y en muchas otras tanto en el libro de cabecera como en las múltiples recomendaciones de lectura que hace Rayo en él.

En la introducción aparecen dos figuras que me han parecido sobresalientes. La primera es un grafo que nos permite decidir el orden de lectura de los capítulos según nuestros intereses: si, por ejemplo, nos interesa el capítulo 8, antes se nos recomienda leer el 7 y el 1. La segunda es una gráfica que indica la dificultad matemática y filosófica de cada capítulo, evaluada de 0 a 100. Así, los dos primeros puntúan alto en matemáticas y bajo en filosofía, mientras que en el tercero ocurre lo contrario: la discusión resulta más filosófica que matemática. Curiosamente, la dificultad matemática y la filosófica parecen estar en oposición de fase a lo largo de la obra.

El siguiente bloque, «Decisiones, probabilidades y medidas», puede parecer un cajón de sastre, pero eso no constituye un demérito, sino uno de los atractivos de la obra. Comienza tratando los viajes temporales y la paradoja del abuelo, extendiendo una vez más algunas de sus columnas, como «Viajes a través del tiempo» (octubre de 2009) y «¿Cómo sería el mundo si pudiéramos viajar al pasado?» (febrero de 2016), donde lo que realmente se discute es el libre albedrío. Después continúa con «El problema de Newcomb» (septiembre de 2008), donde se consideran la teoría causal de la decisión y su relación con el dilema del prisionero.

El corazón de este bloque, la teoría de la probabilidad, fue tratado someramente por Rayo en «¿Qué es la probabilidad?» (junio de 2011). Y, una vez más, a través de ejercicios guiados, recibimos un breve pero completo baño en teoría de la probabilidad, donde se abunda en la probabilidad subjetiva, el principio de indiferencia o cómo incorporar nueva información en coherencia con la ley de Bayes, por citar algunas cuestiones relevantes y prácticamente ausentes en la mayor parte de los textos académicos para universitarios. Por supuesto, todo salpicado con nuevas paradojas, como la de San Petersburgo o «La paradoja de los dos sobres» (junio de 2012).

El último bloque, dedicado a la computabilidad y el teorema de Gödel, vuelve a ser un excelente texto tan introductorio como riguroso a las máquinas de Turing y al concepto de función computable, donde se discute la famosa conjetura «P = NP» (abril de 2010) o cómo escribir el número más grande posible, una extensión de «El duelo de los números grandes» (agosto de 2008). Para acabar, tenemos una demostración del teorema de incompletitud de Gödel y su impacto filosófico («Gödel y la verdad axiomática», febrero de 2014), donde sin embargo se excluye una demostración basada en la noción de complejidad de Kolmogórov con la que Rayo nos sedujo en abril de 2012 en la columna «Ordenadores y números naturales», la cual les recomiendo leer si no lo hicieron en su momento.

El anterior libro de Rayo, *The construction of logical space*, editado por Oxford University Press en 2013, fue traducido al español dos años después como *La construcción del espacio de posibilidades* por el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ojalá se repita la historia con esta nueva obra, que, aunque no sea para un público completamente general, es un raro diamante. Aborda ideas poco corrientes en los programas de estudio, como la teoría de la medida («Colecciones no medibles», octubre de 2012), el axioma de elección o «El teorema de Banach-Tarski» (diciembre de 2009), que por sí mismos ya la harían merecedora de un lugar en las bibliotecas universitarias. Y para alguien de ciencias como yo, es una novedad leer sobre cómo los filósofos modernos proponen, discuten e iluminan todos estos temas. Por ello también merece y se ha ganado un lugar en mi biblioteca.

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid



LA MÁQUINA QUE CAMBIÓ EL MUNDO
GÉNESIS, DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DEL ORDENADOR

Salvador Lucas Alba
Ediciones Complutense, 2019
205 págs.

Una historia de la computación para los informáticos del futuro

La génesis y desarrollo del ordenador más allá de Turing, Church y Von Neumann

Resulta difícil sobreestimar la importancia del ordenador en nuestra sociedad. ¿Todavía piensa el lector que eso a lo que llama móvil es un teléfono? No: se trata de un ordenador que, entre otras muchas funciones, permite realizar llamadas telefónicas. ¿Cree que lo que conduce es un coche? Cada vez más, los automóviles se están transformando, para bien o para mal, en computadoras con ruedas y motor. Y eso por no hablar de televisores, neveras y otros aparatos: la famosa Internet de las cosas traerá millones de ordenadores conectados, disimulados, por ejemplo, en nuestra ropa o incluso en el interior de nuestro cuerpo.

La aparición del ordenador constituye un hecho singular y único en la historia. Por primera vez tenemos a nuestra disposición una máquina universal, capaz de emular, o simular, a cualquier otra máquina. Obviamente, esa naturaleza universal hace que la primera vez que aparece un ingenio semejante sea también la última: un hito en la historia de la humanidad. El libro que nos ocupa narra justamente la historia de las ideas y las personas que protagonizaron el esfuerzo que acabaría dando como resultado el ordenador moderno.

Salvador Lucas, catedrático de lenguajes y sistemas informáticos de la Universidad Politécnica de Valencia, nos cuenta que ese esfuerzo nació con un problema matemático planteado por David Hilbert a principios del siglo xx y con la brillante solución encontrada por un joven genio llamado Alan Turing [*véase* «Ordenadores, paradojas y fundamentos de las matemáticas», por Gregory Chaitin; Investigación y Ciencia, julio de 2003]. El pistoletazo de salida se da en el mundo de las matemáticas, pero el trabajo de convertir esas máquinas universales en aparatos reales y tangibles se desarrolla a través de la física, las matemáticas, la lógica y la ingeniería para acabar creando una nueva disciplina: la informática.

La narrativa temporal que usa el autor, ordenada (casi) cronológicamente desde el problema que plantea Hilbert y resuelve Turing hasta hoy en día, nos lleva por toda una serie de pasos: la necesidad de programar los ordenadores con arquitectura de Von Neumann; los principios del uso del código máquina; los lenguajes de programación de alto nivel —¡qué acertada la decisión de ilustrar los programas usando Fortran!— y su evolución natural desde instrumentos para programar ordenadores a constructores de mundos de acuerdo a diferentes modos de conceptualizarlos (programación lógica, funcional, orientada a objetos e imperativa). También nos conduce por los problemas asociados a desarrollar programas correctos; por la crisis del *software* —aunque si después de sesenta años el *software* sigue en crisis, tal vez ese sea su estado natural—; por los sistemas operativos y, finalmente, por Internet y los protocolos que la hacen posible. El texto fluye de manera natural de un tema a otro y el lector se convence en todo momento de la necesidad del siguiente paso, como si todo fuera un plan trazado de antemano.

No cabe duda de que esa narrativa empuja a entender la informática como una disciplina cohesionada y coherente, aunque todavía no esté claro si se trata de una ciencia, una ingeniería, un poco de todo o incluso algo completamente nuevo. No importa: la historia de la que se ocupa el libro de Lucas merece ser contada, y es notable la cantidad de temas que quedan bien explicados en un texto de apenas 200 páginas.

El relato que aparece al principio de la obra, que tiene como protagonistas a Turing, Church, Von Neumann, el ENIAC, etcétera, ha sido contado en otras ocasiones [*véase* «Lo que Church y Turing ya sabían sobre mi portátil», por Salvador Lucas; Investigación y Ciencia, agosto de 2016]. Sin embargo, no es frecuente encontrar los temas tratados entre los capítulos 6 y 10. Nombres como Charles Antony Richard Hoare, Niklaus Emil Wirth, Peter Landin, Robert Kowalski, Alan Kay o Alan Perlis no resultan muy familiares a informáticos que no sean «de carrera», por así decirlo, y no es frecuente verlos en los libros de divulgación. *La máquina que cambió el mundo* hace justicia a estos pioneros y a algunos más explicando con claridad sus aportaciones, indispensables para entender la programación tal y como se practica hoy en día.

Hay algunos apartados del texto que resultan especialmente notables. Por ejemplo, poner énfasis en que «las ideas fundamentales que subyacen a estos [los lenguajes de programación] son las que ya avanzaron los lenguajes introducidos en las décadas de los años sesenta y se-

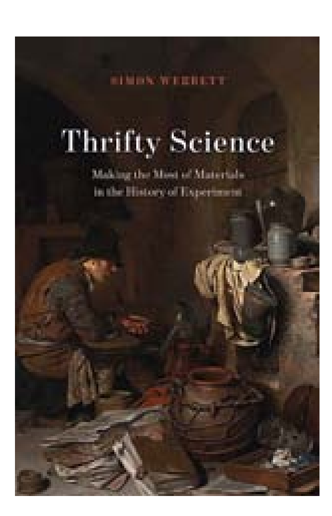
tenta del siglo xx» (pág. 146) no solo es muy acertado: ¡es necesario! Cuando los lenguajes de programación dominantes hoy en día nos cuentan cosas como que Java tiene lambdas o que las *templates* de C++ son de lo que no hay, uno, que conoce Lisp y Smalltalk, no puede evitar sonreír con condescendencia al ver cómo la mercadotecnia que rodea al desarrollo de *software* se aprovecha de la ignorancia histórica de los mismos desarrolladores. Lisp y Smalltalk ya disponían de esos mecanismos en los años setenta, y bien implementados. Por ejemplo, las lambdas de Java ni siquiera son *closures* en condiciones, y cualquiera que conozca las macros de Lisp sabe que las *templates* de C++ no pueden competir con ellas. Disculpe el lector esta digresión técnica: tan solo quería enfatizar que el libro de Lucas puede ayudar a mitigar esta lamentable situación de ignorancia.

De igual modo, la mención al «problema del usuario final programador» (pág. 170) es otro acierto del texto. En este caso se subraya que el usuario final solo puede ser un creador, no un consumidor pasivo de *software* de terceros y dejado a merced de que otros decidan lo que puede y no puede hacer con su ordenador. Esta es una máquina universal, y como tal puede hacerse con ella lo que se desee. Y para ello solo es necesario saber hacerlo: es decir, saber programar. La idea de que, en un futuro, todos los usuarios deberían saber programar equivale a afirmar que todo usuario debería poder utilizar el ordenador para, como quería Douglas C. Engelbart en 1962, aumentar su intelecto.

Por último, y como esto es una reseña y no un elogio —muy a nuestro pesar—, procede mencionar algunas carencias del texto. Nada importante en realidad. En primer lugar, la historia del principio olvida todo el esfuerzo anterior al siglo xx por mecanizar los asuntos humanos: desde el *Ars magna* de Ramon Llull a finales del siglo xiii hasta los autómatas mecánicos de Jacques de Vaucanson en el siglo xix, pasando por las calculadoras de Pascal y Leibniz en el siglo xvii. Sin embargo, su ausencia se entiende si consideramos el contenido central del libro. También, cuando en la página 186 se comenta el *software* que se ejecuta en los navegadores, se mencionan Java y las *applets*, hoy prácticamente desaparecidos de los entornos web, y en cambio no se dice nada de Javascript, sin duda el lenguaje de programación más usado en dicho ámbito. Esos párrafos merecerían una actualización. Lo que se explica sigue siendo correcto, pero el ejemplo está obsoleto. Y para terminar, el índice final contiene errores, pues los términos y los números de página (en los casos consultados) no se corresponden.

El libro de Lucas destila amor y pasión por la informática en cada uno de sus párrafos y nos transporta de la máquina de Turing a los ordenadores actuales de una manera interesante, didáctica y entretenida. Alan Kay decía en 1997 que la revolución informática todavía no había tenido lugar (afirmación que hace extensiva hasta nuestros días). Podemos decir, sin riesgo a equivocarnos, que entender la informática tal y como la esboza este maravilloso libro constituye un primer paso en esa revolución pendiente. Este recensor está convencido de que nos encontramos ante una obra inspiradora y que bien podría ser la semilla de esos futuros informáticos que Lucas, siguiendo a Alan Kay, reclama al final de su obra.

—Jordi Delgado
Universidad Politécnica de Cataluña



THRIFTY SCIENCE
MAKING THE MOST OF MATERIALS IN THE HISTORY OF EXPERIMENT
Simon Werrett
The University of Chicago Press, 2019
304 págs.

Economía de medios

Los inicios domésticos de la experimentación científica

En un pasillo de la facultad de biología de la Universidad de Barcelona hay una vitrina donde se expone, entre otros objetos científicos, el microscopio del profesor Ramon Margalef, pionero de la ecología marina y primer sistemático que vinculó la ecología general a los procesos termodinámicos irreversibles. Margalef, colaborador habitual de estas páginas durante años, empezó su carrera estudiando el plancton. Carecía de medios económicos para comprarse un microscopio solvente, por lo que, con piezas de ferretería y del mercado de segunda mano, pulió las lentes y se construyó artesanalmente el suyo. Era principios de los años cuarenta del siglo xx, no los tiempos heroicos de Antonie van Leeuwenhoek en los albores de la Modernidad.

No obstante, tras el éxito de la física en la Segunda Guerra Mundial, desde el radar hasta el dominio del átomo, o de la biología y la medicina en la prevención y erradicación de enfermedades, cobró fuerza la idea de que no había gran ciencia sin máquinas imponentes, fuesen aceleradores de partículas, telescopios o tomógrafos axiales. Sin rechazar la visión de una ciencia compleja y depurada en su técnica, se vuelve ahora, sin embargo, a una ciencia que, con el lenguaje al uso, llamaríamos sostenible, con la mirada puesta en lo manejable, lo pequeño, la reparación de lo estropeado, la frugalidad y el reciclaje. Se critica el despilfarro de energía de muchos laboratorios científicos, muy superior al gasto de espacios industriales equivalentes.

Muy pocos saben que esas prácticas tienen antecedentes remotos, los cuales Simon Werrett se propone desentrañar en *Thrifty science*. Los siglos xvii y xviii fueron tiempos de austeridad. Pese a la limitación de medios experimentales, los ensayos transformaron los hogares. Su investigación expande el horizonte de la historia de la ciencia, centrada todavía en la circulación de las ideas, hasta terrenos apenas hollados, como el trasiego de

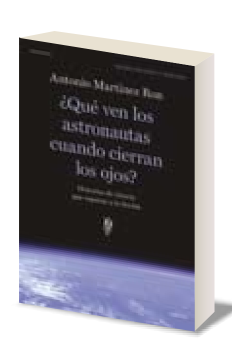
objetos. Las ideas viajan incorporadas en una estructura material: libros, instrumentos y especímenes. Una vez se han utilizado o se han roto los objetos, se han desgastado los especímenes o se han llenado de polvo los libros, no se ha destruido con ello el conocimiento. Las técnicas añejas siguen empleándose mucho después de su tiempo de esplendor, lo mismo que los instrumentos o los aparatos de laboratorio.

La historia de la instrumentación científica ha tenido su propio recorrido, pasando de un estudio técnico de su origen y desarrollo a un enfoque más cultural y social. Sin abandonar su finalidad científica, por supuesto. Se recuerda, a este respecto, *Leviathan and the air-pump*, libro de Steven Shapin y Simon Schaffer sobre la emergencia de la ciencia experimental británica a través del desarrollo de la bomba que permitía extraer aire de un recipiente de cristal, en cuyo interior se podían explorar fenómenos diversos. O la reconstrucción llevada a cabo por H. Otto Sibum del aparato diseñado por James Joule para medir el equivalente mecánico del calor. En esa línea, los historiadores de instrumentos se han centrado en microscopios, telescopios, barómetros, herbarios o linternas mágicas; los de espacios científicos, en laboratorios, observatorios astronómicos, gabinetes de historia natural o museos. Este libro abre una nueva línea: la ciencia en casa, vale decir, en la cocina y dependencias anexas, sirviéndose de sus útiles y cacharros para conferirles un destino diferente del habitual.

Vinculados con la Real Sociedad de Londres para la Mejora del Conocimiento Natural, fundada en 1660, Robert Boyle, Robert Hooke e Isaac Newton, entre otros, forjaron un método experimental que dio origen a nuevos conocimientos, más fiables y útiles, siguiendo los pasos de Francis

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



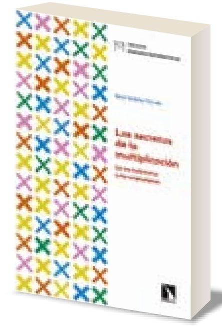
¿QUÉ VEN LOS ASTRONAUTAS CUANDO CIERRAN LOS OJOS?
HISTORIAS DE CIENCIA QUE SUPERAN LA FICCIÓN
Antonio Martínez Ron
Crítica, 2019
ISBN: 978-84-9199-139-7
376 págs. (16,90 €)



500 AÑOS DE FRÍO
LA GRAN AVENTURA DEL ÁRTICO
Javier Peláez
Crítica, 2019
ISBN: 978-84-9199-138-0
320 págs. (19,90 €)



LOS SECRETOS DE LA MULTIPLICACIÓN
DE LOS BABILONIOS A LOS ORDENADORES
Raúl Ibáñez Torres
Catarata, 2019
ISBN: 978-84-9097-826-9
160 págs. (13 €)



EL UNIVERSO IMPROBABLE
ESTRELLAS FUGITIVAS, PARTÍCULAS, VACÍO, INFINITO, PORTENTOSOS AGUJEROS NEGROS Y MUCHAS OTRAS CUESTIONES CIENTÍFICAS SOBRE LA VIDA Y EL COSMOS
Rafael Bachiller
Prólogo de Juan Luis Arsuaga
La Esfera de los Libros, 2019
ISBN: 9788491646785
288 págs. (21,90 €)





FILOSOFIA DE LA TECNOLOGIA
Mario Bunge
Dirigido y traducido al catalán por Antoni Hernández Fernández
Publicacions Institut d'Estudis Catalans, 2019
ISBN: 978-84-9965-484-3
177 págs. (18 €)



INSTRUMENTOS DE LA CIENCIA ESPAÑOLA
LOS APARATOS HISTÓRICOS DEL CSIC
Esteban Moreno Gómez
Catarata, 2019
ISBN: 978-84-9097-751-4
192 págs. (20 €)

Bacon y abriendo el camino a la Ilustración. Aquella filosofía experimental no era una búsqueda desinteresada de la verdad, sino que emergía entrelazada con una pléyade de intereses económicos y políticos, con la mirada puesta en la expansión del comercio y del poderío colonial.

Con una parquedad notable de medios se dio un impulso extraordinario al conocimiento. Newton, Watt, Priestley y Franklin lograron hitos decisivos con nuevas teorías sobre la luz y el color, la química de los gases, la naturaleza eléctrica de los rayos o la máquina de vapor. No quiere ello restar mérito a lo realizado en otros lugares, dependientes de la milicia, la Iglesia o la universidad. Ese fenómeno se explica por el deseo, motor de la ciencia en los inicios del siglo xvii, de alejar el foco del apriorismo de la filosofía para centrarlo en los experimentos, de acuerdo con el programa esbozado por Bacon en *The advancement of learning* y *Novum organum*. La nueva ciencia que postulaba debía conjugar el conocimiento práctico de la vida diaria, asistemático aunque útil, con la filosofía natural de las universidades, sistemática aunque inútil. La habilidad en el manejo de los quehaceres domésticos constituía el punto de partida para la investigación de la naturaleza.

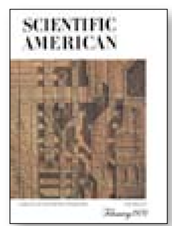
Otro protagonista asociado con el surgimiento de la ciencia experimental fue Samuel Hartlib, quien se dedicó a intercambiar conocimientos prácticos, naturales e históricos, así como ensayos y recetas, con un círculo de amigos, entre ellos el metalúrgico Gabriel Plattes, los terratenientes John y Mary Evelyn y el químico Boyle. La Real Sociedad contaba con miembros del círculo de Hartlib. En esa institución se creó la figura del preparador de experimentos, que los repetía ante su selecta audiencia tras haberlos ensayado en su propia casa. Se solicitaba también la formulación de hipótesis para explicar las causas determinantes de los resultados. Miembro conspicuo de esa filosofía fue Boyle, a quien debemos en buena medida la metodología empleada en los ensayos. Pese a ser sumamente rico, Boyle economizaba en medios y aconsejaba dar un nuevo uso a los utensilios caseros para los experimentos. Para que la casa fuera centro de trabajo, había que acondicionarla con espacios que sirviesen de laboratorio u observatorio. Esto supuso sacar a los animales del interior y confinarlos en cuadras externas. Nuevos espacios que exigían nuevos muebles, con la creación de gabinetes, alacenas para medicinas y productos químicos.

Otra estancia reformada fue la bodega, tranquila y al abrigo de ruidos y distracciones, donde la temperatura era baja y se almacenaban viandas y bebidas. Ofrecía ventajas para la experimentación, con la exploración de los procesos de coagulación, refrigeración y conservación. Fue en la bodega donde Boyle realizó notables experimentos sobre fosforescencia, congelación de la cerveza y conservación de las flores. De hecho, escribió un librito en 1665 titulado *Consideración escéptica sobre el calor de las bodegas en invierno y su frío en verano*. Esa reputación de la bodega como lugar de investigación persistió a lo largo del siglo xviii. Aunque cualquier sitio, y sobre todo cualquier objeto, podía valer para la experimentación. Por botón de muestra, la teoría de la electricidad entendida como un doble fluido propuesta en 1759 se basó en el comportamiento de los calcetines de seda.

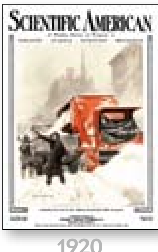
—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

FEBRERO



1970



1920

1870

1970

La era de la microelectrónica

«Desde la aparición del transistor en 1948 —que en su momento parecía una maravilla de compacidad comparado con el tubo de vacío de vidrio—, el tamaño de los componentes electrónicos se ha ido reduciendo en un factor de diez cada cinco años, aproximadamente. Gran parte del estímulo hacia la miniaturización de los circuitos electrónicos procedía de los programas de misiles balísticos. Pero conforme se desarrollaba la microtecnología, esta se aplicaba de inmediato a las calculadoras comerciales. Hoy parece inevitable que los circuitos electrónicos no tarden en abrirse paso hacia toda una variedad de nuevas aplicaciones cuyas repercusiones en la vida cotidiana (en el hogar, el trabajo, la enseñanza y los transportes) serán profundas.»

1920

Pionero de los cohetes

«El doctor Robert H. Goddard, de la Universidad Clark, en su conferencia sobre el aparato que inventó para la exploración de las capas ultra altas de la atmósfera, mencionó de pasada la posibilidad de dotar a su aparato de una energía impulsora suficiente para hacerlo llegar a la Luna. Cuando el doctor Goddard haga volar por primera vez su pequeño mensajero, de acuerdo con el propósito que le llevó a realizar esa investigación, conseguirá datos de alto valor meteorológico. Pero no apuntará a la Luna. Eso, por ahora, tendrán que hacerlo otros.»

Hielo para refrigerar

«A fin de acelerar la recogida de hielo natural, se ha presentado la sierra motorizada que se ilustra. El útil se compone de un motor de gasolina, similar al de los autos, y una sierra circular. El operario lo maneja impulsándolo con su propio esfuerzo. Esta sierra portátil corta el hielo en cuadrados de seis metros de lado. Los cuadrados se conducen por el agua hasta un grupo de cuatro sierras que los cortan en barras de las medidas normalizadas.»

El futuro de la energía

«¿Qué haremos cuando se agoten nuestras reservas de carbón y petróleo? Es cierto que podríamos obtener energía del agua, del viento y de las mareas y las olas del mar. Pero esas fuentes no van a suministrarnos toda la energía que necesitamos. Las mareas dan muy escaso rendimiento a unas fuertes inversiones en plantas de gran tamaño, y las dificultades para sacar provecho del océano son casi insuperables. ¿A qué recurriremos como futuras fuentes de energía? El tema fue abordado en una conferencia muy interesante pronunciada hace poco por *sir* Oliver Lodge ante la Real Sociedad para el fomento de las Artes, la Industria y el Comercio. Señaló los inmensos recursos de la energía atómica, aún por explorar. Puede que algún día sepamos cómo aprovechar adecuadamente esas fuentes de energía.»

1870

Expertos del buceo

«No hay operación de ingeniería submarina más importante ni acompañada de más riesgo personal que la inmersión. Este arte, sin embargo, ha progresado tanto hasta hoy, y se han perfeccionado tanto los aparatos de buceo, que los buceadores pueden ya sumergirse hasta profundidades de más de treinta metros. Estados Unidos cuenta con unos treinta buzos profesionales, cuya mortalidad anual media viene a ser de unos cuatro sobre aquella cifra.»

Aparición de *Nature*

«Acusamos recibo de los primeros números de *Nature*, un nuevo semanario científico ilustrado publicado por Macmillan & Co. Está dedicado a debates de ciencia más bien abstractos y a la crónica de la actividad investigadora. Esta nueva publicación será idónea para que halle el favor de los científicos profesionales, pero apenas se popularizará en el sentido más amplio. Está impresa en un estilo excelente.»



RECOGIDA de hielo natural en un río con la ayuda de una sierra mecánica de gasolina, 1920.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXII, N.º 7, 14 DE FEBRERO DE 1920



EVOLUCIÓN

Ejercicio para el cerebro

David A. Raichlen y Gene E. Alexander

Ciertas transiciones fundamentales de nuestra historia evolutiva podrían haber conectado cuerpo y mente de formas que podemos utilizar para ralentizar el envejecimiento del cerebro.

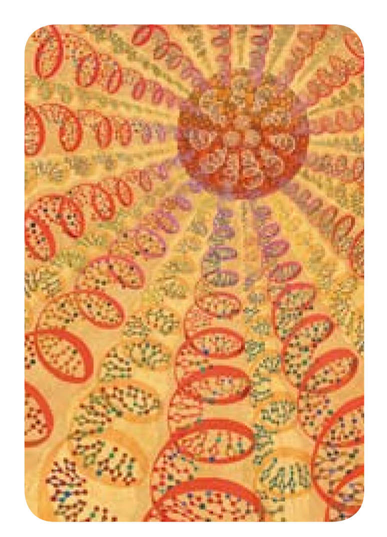
FÍSICA

El experimento de la triple rendija

Urbasi Sinha

La puesta al día de un experimento clásico establece nuevas verdades mecanocuánticas y abre el camino a una nueva estrategia para la computación cuántica.





FARMACOLOGÍA

El poder de las esferas de ácidos nucleicos

Chad A. Mirkin, Christine Laramy y Kacper Skakuj

Fármacos basados en moléculas de ADN o ARN dispuestas en forma de esferas actúan sobre los cánceres cerebrales y otras enfermedades que no responden a los tratamientos usuales.

GEOFÍSICA

La dinamo terrestre, un desafío centenario

Emmanuel Dormy

¿De dónde proviene el campo magnético de la Tierra? Cálculos teóricos, simulaciones numéricas y experimentos de laboratorio confirman la explicación propuesta por Joseph Larmor hace cien años.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Apuntes, Cómo fugarse de un agujero negro* y *La intersección entre la demostración, los indicios y la imaginación*; Ana Mozo García: *Un modelo de implantación del embrión*; José Óscar Hernández Sendín: *Las 10 técnicas emergentes más prometedoras del momento* y *¿Llegarán a ser conscientes las máquinas?*; Lorenzo Gallego: *La célula invulnerable*; Pedro Pacheco: *Minería y restauración ambiental en Madagascar*; J. Vilardell: *Cuando las copas cantan* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España



Revista de psicología y neurociencias
Enero / Febrero 2020 · N.º 100
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mente&Cerebro
SEXO ASISTIDO
para personas con discapacidad
La fuerza curativa de la naturaleza
Los «baños de bosque» se convierten en tratamiento médico
Mundo onírico
El significado de los sueños
Sociedad digital
Fotografiar: el nuevo fenómeno de masas
Neurociencia
Cuando la actividad neuronal se desborda